

[Konstrukce odlitků a výroba ocelových forem pro nízkotlaké lití
hliníkových slitin]

[Aluminum parts development and low pressure die casting mold
manufacturing]

Jméno autora: Bc. Jan Hruběš

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Petr Lichý, Ph.D.

Odevzdání: Ostrava [2021]

PODĚKOVÁNÍ:

Chtěl bych poděkovat vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Petru Lichému, Ph.D. a konzultantovi Martinu Máchovi ze společnosti Aludyne s.r.o. za cenné rady, připomínky a pomoc při tvorbě diplomové práce.

Diplomová práce vznikla za finanční podpory projektů „Studentské grantové soutěže“ čísel SP2021/39 a SP2021/41.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá výrobou odlitků z hliníkové slitiny AlSi7Mg0.3, které se odlévají nízkotlakým litím do ocelové formy. Rozebrány jsou zde technologické kroky při navrhování těchto odlitků a jejich úlohu v podvozkové soustavě dopravních prostředků. Popsána je funkčnost ocelové formy a možnosti ovlivnění kvality odlitků za pomoci chlazení, vložkování, a nebo designové úpravy formy. Nahlíženo je rovněž na neshody, které provází výrobní procesy odlitků z hliníkové slitiny AlSi7Mg0.3. Řešení těchto neshod bylo realizováno na reálném výrobním procesu odlitku těhlice.

Klíčová slova

Slitina hliníku AlSi7Mg0.3, nízkotlaké lití, kovová forma

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the production of castings from aluminum alloy AlSi7Mg0.3, which are cast by low-pressure casting into a steel mold. The technological steps in the design of these castings and their role in the chassis system of vehicles are discussed here. The functionality of the steel mold and the possibilities of influencing the quality of castings by means of cooling, inserting or design of the mold are described. The discrepancies that accompany the production processes of aluminum alloy AlSi7Mg0.3 are also viewed. The solution of these discrepancies was realized on the real production process of the rear knuckle casting.

Key words

Aluminium alloy AlSi7Mg0.3, low pressure die casting, die mould

Obsah

1	Úvod.....	7
2	Výpočetní technika ve slévárenství	8
2.1	Numerické řešení tepelných úloh	9
3	Klasifikace neshod hliníkových odlitků odlévaných do kokil.....	12
3.1	Vnitřní / povrchové vady a nedokonalosti.....	13
3.1.1	Staženiny.....	13
3.1.2	Vady způsobené plynem	15
3.1.3	Vady vznikající při plnění formy.....	17
3.1.4	Nežádoucí částice	19
3.1.5	Vady způsobené tepelným pnutím.....	19
3.2	Povrchové vady a nedokonalosti	20
3.2.1	Vady na rozhraní kovové matrice – tekutý kov	20
3.3	Geometrické vady a nepřesnosti	23
4	Nízkotlaké lící stroje CPC	24
4.1	Princip tlakování a plnění formy	24
4.2	Rozložení linky pro lící stroj CPC.....	24
4.2.1	Tavící pec.....	25
4.2.2	Odplynění.....	26
4.2.3	Chod ocelové formy.....	26
4.2.4	Quench	27
4.2.5	Laserové označení.....	27
4.2.6	Střížný lis	28
4.2.7	Pila	28
4.2.8	X-ray	29
	Aludyne INC.....	30
4.3	O společnosti.....	30
4.4	Produkty.....	30
4.4.1	Zadní těhlice	30
4.4.2	Přední těhlice	31
4.4.3	Kontrolní ramena	32
5	Praktická část	33
5.1	Uvedení do vývoje odlitku.....	33
5.2	Konstrukce odlitku pro nízkotlaké lití	34
5.2.1	Prvky vtokové soustavy a odlitku pro nízkotlaké odlévání těhlic	34
5.2.2	Prvky vtokové soustavy a odlitku pro nízkotlaké odlévání těhlic s jádrem	

5.2.3	Prvky vtokové soustavy a odlitku pro nízkotlaké odlévání kontrolních ramen	36
5.2.4	Přidavky na obrobení	36
5.2.5	Technologické úkoly	37
5.2.6	Geometrie odlitku – Usměrněné tuhnutí.....	37
5.3	Funkčnost navrhovaného dílu	40
5.4	Konstrukce ocelové formy pro nízkotlaký lící stroj CPC.....	41
5.4.1	Rozložení dílu a forem.....	41
5.4.2	Design a mechanismus.....	42
5.4.3	Mechanismus otevírání formy a nepravá jádra	45
5.4.4	Vložky a dutiny ve formě	46
5.4.5	Chlazení	47
5.4.6	Pnutí ve formě a jeho eliminace	50
6	Uvedení formy do provozu - vzorkování.....	52
6.1	Problém s přetoky	52
6.2	Problém s nedolitím	53
6.3	Problém se studenými spoji	55
6.4	Overení kokily a vývoj zmetkovitosti.....	57
6.5	Shrnutí kapitoly.....	59
7	Závěr	61
	Seznam použité literatury	62
	Seznam zkratk	68
	Seznam obrázků.....	69

1 Úvod

Využití simulačních a výpočetních programů v rané fázi navrhování nových produktů vstupuje do chodu společnosti v mnoha odděleních, a to přes vývojové po výrobní. Díky těmto technologiím lze navrhnout řešení problému na budoucí vyráběný díl a tím předejít mnoha problémům již v rané fázi projektu. Tento aspektem je velmi důležitý, protože může zvýšit konkurenceschopnost podniku. Podnik tak dokáže reálně stanovit cenu pro výrobu produktu, a to vše v digitální formě návrhu. Výrobní technologie jsou tímto přístupnější novým a budoucím inženýrům, kteří si díky vizualizaci dat dokáží lépe představit výrobní proces již před samotným zahájením reálné výroby. Hlavním cílem diplomové práce je řešení problematiky výroby odlitků ze slitiny Al-Si, vyráběné technologií nízkotlakého lití do kovových forem. Konkrétně se zaměřím na výrobu automobilových těhlic z podeutektické slitiny AlSi7Mg0.3. Dále budu v diplomové práci popisovat výrobní postup a následné vzorkování formy pro odlitky, které jsou vyráběné na nízkotlakých licích strojích značky CPC ve společnosti Aludyne INC.

2 Výpočetní technika ve slévárenství

Počítačová simulace je vysoce účinný nástroj optimalizace procesů a dějů s využitím vysoce výkonných počítačů. V 60. letech se při řešení některých úloh nestacionárního sdílení tepla a hmoty začaly uplatňovat analogové počítače. V 80. letech se objevily první slévárenské simulační softwary zaměřené na tuhnutí odlitků. V Japonsku byly známy pod označením Ishikawajima Harima, Kawasaki Steel, Kawasaki Heavy Industry, Komatsu Seisakusho, Kobe Steel, Toyota; v USA se jednalo o Cast Anasys, Marc, Mitas II. V Evropě vznikly první simulační programy na Slévárenském institutu RWTH Aachen v Německu (software neměl označení) a v Anglii simulační program Duct.

Dnes nacházíme na evropském trhu celou řadu slévárenských komplexních simulačních programů, které dávají uživateli možnosti řešení různých úloh, stále se inovují a doplňují. Simulační programy se dnes orientují zejména na řešení těchto hlavních skupin problémů:

- plnění forem;
- tuhnutí a chladnutí odlitků (ve formě i po vyjmutí z formy);
- vznik struktury a utváření vlastností odlitku;
- vznik vnitřních pnutí a deformací, popř. sledování struktury.

Kvalita simulačních programů, jejich vypovídající hodnota a míra shody výsledků simulace s realitou jsou dány zejména těmito okolnostmi:

- kvalitou matematického popisu dílčích dějů - tj. rozpracováním Fourierovy diferenciální rovnice vedení tepla, včetně správné volby počátečních a okrajových podmínek;

- zahrnutím odchylky chování a stavu odlévaného materiálu od ideálního předpokladu jednofázového stavu taveniny (např. nenewtonská kapalina, teplotní závislost postupného uvolňování latentního tepla při tuhnutí taveniny atd.);

- tepelně-fyzikálním definováním vlastností forem i odlévaného materiálu v závislosti na teplotě v celé potřebné šíři teplotního intervalu.

Kromě toho je také důležité, jakým způsobem tyto simulační programy definují proudění kapaliny pomocí rovnice kontinuity a Navier-Stokesova zákona o zachování hybnosti, tuhnutí a chladnutí odlitků Fourierovou diferenciální rovnicí pro přenos tepla,

úroveň zbytkových či vnitřních pnutí zákona mechaniky tuhého tělesa při plastické a elastické deformaci atd. S tím je spojeno i stanovení výchozích a okrajových podmínek řešení. Poměrně velkým problémem při simulačních výpočtech je stanovení hodnot potřebných tepelně-fyzikálních veličin v závislosti na teplotě. Toto je nejčastější příčinou rozdílů mezi výsledky získanými simulačním výpočtem a experimentálním měřením při srovnatelných podmínkách.

2.1 Numerické řešení tepelných úloh

Je obecně známo, že řešení tepelných úloh v systémech s rozloženými parametry lze provést analyticky, numericky nebo experimentálně. Každá z těchto úloh může být deterministická nebo stochastická.

V počítačových simulačních výpočtech tepelných dějů mezi odlitkem a slévarenskou formou mají uplatnění numerické metody. Jejich podstata závisí na diskretizaci proměnných, k čemuž přispívá typická opakovatelnost jednoduchých algebraických operací určitého typu - to odpovídá operačním vlastnostem číslicových počítačů. Přednost numerických metod je v tom, že umožňují získat řešení tepelné úlohy v konečném počtu diskrétních míst (uzlů) zvolené diferenční sítě nebo sítě konečných prvků, a to buď v celé oblasti, nebo její povrchové části. Mezi numerické metody se řadí především metoda konečných prvků a metoda konečných diferencí.

Metoda konečných prvků (MKP), resp. mezinárodně označovaná FEM (Finite Element Method), je založena na rozdělení dané oblasti na konečný počet jednoduchých prvků - konečných prvků -, o nichž předpokládáme, že jsou navzájem spojeny v konečném počtu uzlových bodů na hranicích prvků. Skutečný průběh vyšetřované fyzikální veličiny, resp. teploty uvnitř prvků, se při řešení aproximuje zvolenou funkcí, přičemž je nutné, aby tato funkce byla jednoznačně určena hodnotami veličiny v uzlových bodech. Dřívější nevýhody spojené s vyššími nároky na kapacitu paměti a rychlost počítače jsou dnes překonány.

Metoda konečných diferencí (MKD), mezinárodně označovaná FDM (Finite Differences Method), označovaná též jako metoda sítí, je založena na aproximaci základní diferenciální rovnice s příslušnými okrajovými podmínkami odpovídající diferenční rovnicí, jež má tvar algebraických rovnic. Dokonalost aproximace spočívá v nahrazování derivace přesnějšími výrazy. Náhrada se provádí v diskrétních místech

tvořených uzly sítě, které zahrnují zkoumanou oblast. Konečným výsledkem algebraických operací je určení teploty v daném uzlu sítě.

Méně časté použití metody MKP oproti běžně používané metodě MKD lze vysvětlit tím, že na rozvoj programů používajících MKD byly vynaloženy značné finanční prostředky. I když obě metody (MKP a MKD) jsou založeny na jisté diskretizaci kontinua, má MKP ve srovnání s MKD určité výhody. Dovoluje lepší geometrický popis a vystižení okrajových podmínek při složitých tvarech integrační oblasti.

Využívá místně zjemněné diskretizace ve významných částech řešené oblasti bez zvláštních úprav výpočtového programu. Umožňuje jednodušší použití vyšších typů aproximace hledané funkce s cílem zvýšení přesnosti řešení.

Při řešení tepelných poměrů ve slévárenských formách byla porovnávána vhodnost numerické metody MKP a MKD. Dospělo se k závěru, že pro velkou hraniční plochu je vhodnější metoda MKP. V úlohách, kde se řeší rozložení teplot, je MKD citlivější na přesnost ve větších hloubkách pod povrchem. Dále bylo pro obě metody provedeno srovnání počtu a tvarů elementů simulační sítě. [1]

Řešení jednotlivých simulačních softwarů:

Tabulka 1 Simulační softwary

Solution method	Finite Difference Method	Finite Volume Method	Finite Element Method	Vector Element Method
AutoCAST				✓
CAPCAST			✓	
CastCAE		✓		
MAGMASoft	✓			
Nova-Solid/Flow		✓		
ProCAST			✓	
FLOW-3D Cast	✓		✓	
SOLIDCast	✓			

Poznámka:

FEM (Finite Element Method) - metoda konečných prvků (MKP)

FDM (Finite Difference Method) - metoda konečných diferencí (MKD)

MM (Module Method) - modulová metoda

MagmaSoft předpovídá kvalitu odlévání pomocí simulace plnění formy, tuhnutí formy, chlazení a napětí popřípadě deformace vznikající jak ve formě, tak v odlitcích. Program MAGMAsoft je založen na modulární struktuře, která zahrnuje veškeré funkce potřebné pro komplexní simulaci procesu odlévání. Hlavními moduly jsou MAGMAfill, který poskytuje pohled na samotné plnění formy tekutým kovem a MAGMAsolid, který nám znázorňuje proces tuhnutí a chladnutí kovu ve formě. Program nabízí široké spektrum řešení. Lze například simulovat analýzu masivních ocelových a litinových odlitků odlévaných gravitačně do písku, odlévání slitin mědi nebo nízkotlaké odlévání slitin hliníku.

Simulaci jde rozdělit na následující:

- I. Preprocessing – Návrh a importování geometrie formy, odlitku a vtokové soustavy. Nastavení vstupních podmínek (materiál, lící parametry).
- II. Processing – Výpočet požadovaného procesu.
- III. Postprocessing – Vizualizace výsledků.

Následující kapitoly rozeberou nejčastější vady spojené s nízkotlakým odléváním slitin hliníku a jejich možnou predikci během navrhování designu odlitku, popřípadě eliminaci u rozběhlých projektů.

3 Klasifikace neshod hliníkových odlitků odlévaných do kokil

Norma EN 12258-1: 20125 definuje „neshodu“ neboli vadu jako charakteristiku kvality, která neumožňuje produktu vykonávat požadovanou funkci. Tato evropská norma (EN 12258-1: 2012) definuje obecné pojmy týkající se výrobků vyrobených ze slitin hliníku, jako je zpracování, odběr vzorků, testování a celkové vlastnosti. Naopak přítomnost nedokonalosti nemusí nutně znamenat, že výrobek není vhodný k použití. Nedokonalost by měla být hodnocena pomocí správné stupnice založené na souvisejících specifikacích, aby se rozhodlo, zda má produkt nezbytnou úroveň kvality, aby byl vhodný pro použití.

- I) morfologie / lokalizace vad (vnitřní, vnější, geometrické);
- II) metalurgický původ vad (např. plynná pórovitost, smrštění tuhnutím atd.);
- III) specifický typ vad (stejný metalurgický jev může generovat různé vady).

Úroveň I rozlišuje vady na základě jejich umístění a vyšetřovacích technik vhodných pro jejich detekci (vizuální kontroly a kontroly včetně sypkých materiálů). Na této úrovni jsou zahrnuty vnitřní a vnější (tj. povrchové) vady, zatímco podpovrchové vady (tj. tak blízko povrchu, že ovlivňují vnější aspekt odlitku) jsou považovány za povrchové vady. A konečně, geometrické vady znamenají nesoulad odlitku s navrženým tvarem, pokud jde o rozměry a tolerance. [7]

Úroveň II je zaměřena na metalurgický původ vad. Poruchy jsou seskupeny do několika kategorií, jako jsou defekty smršťování, defekty související s plynem, defekty související s plněním, nežádoucí fáze, defekty tepelné kontrakce a defekty interakce kov-matrice. Znalost metalurgického původu poskytuje výchozí bod pro nápravná opatření v procesu. [7]

Úroveň III určuje konkrétní typ vady. Termín používaný k popisu konkrétního typu vady obvykle umožňuje lepší vysvětlení metalurgického původu uvedeného v úrovni II. [7]

Současná klasifikace vad a nedokonalostí je hybridní a víceúrovňová, jak je schematicky znázorněno v tabulkách 1, 2 a 3. Tento návrh se týká metalurgických vad vznikajících u výrobků z trvalých forem, a to jak odlévaných gravitační, nízkotlakou, tak vysokotlakou technologií. Naproti tomu vady související s manipulačními,

dokončovacími a obráběcími operacemi, jinými slovy po vyražení z matrice, jsou z této klasifikace vyloučeny, i když by mohly být možnými příčinami odmítnutí produktu.

3.1 Vnitřní / povrchové vady a nedokonalosti

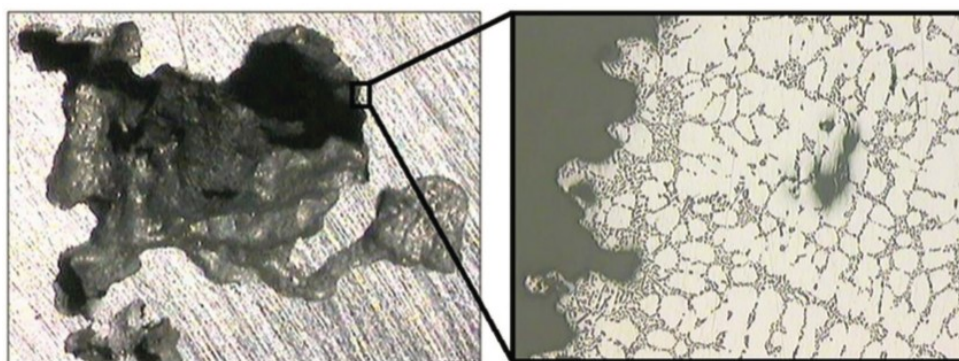
3.1.1 Staženiny

Staženiny jsou kovové diskontinuity způsobené objemovou kontrakcí během tuhnutí a vyskytují se v regionech s nedostatečným nebo dokonce chybějícím dosazováním tekutého kovu. Takové regiony jsou poslední, které tuhnou (horká místa), a jsou obvykle dobře ukryté uvnitř, někdy jsou ale dostatečně blízko k povrchu plochy odlitku, aby způsobily povrchové vady.

Makro-staženina (A1.1 v tabulce 1) je relativně velká (s ohledem na tloušťku odlitku) dutina vytvořená uvnitř tepelného uzlu v důsledku objemové kontrakce během tuhnutí.

Jak je znázorněno na obrázku 1, makro smršťování je charakterizováno drsnými a houbovitými povrchy v důsledku přerušovaného růstu vznikajících dendritů. [2-4], [8-13]

Inter-dendritické staženiny (A1.2 v tabulce 1) se tvoří, když kapalným kovem nemůže adekvátně napájet mezidendritické oblasti, aby se vyvážílo smršťování během tuhnutí (obrázek 2). Výsledné malé diskontinuity jsou vzájemně propojeny a mohou ovlivnit tlakovou těsnost. [2-4], [8-24]



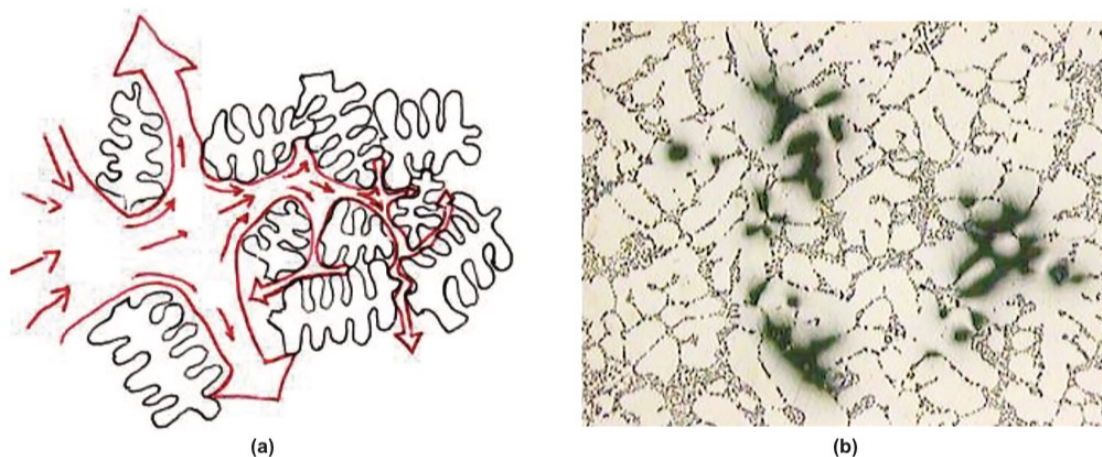
Obrázek 1 Makrografický snímek staženiny (vlevo) v porovnání s mikrografickým snímkem (vpravo)

Tabulka 1. Klasifikace vnitřních vad a nedokonalostí				
Úroveň I	Úroveň II		Úroveň III	
A Vnitřní vady a nedokonalosti	A1	Staženiny	A1.1	Makro-staženiny
			A1.2	Interdendritické staženiny
			A1.3	Porézní vrstva
	A2	Vady způsobené plyny	A2.1	Porezita - zachycený vzduch
			A2.2	Vodíková porezita
			A2.3	Porezita z výparů
			A2.4	Porezita z maziva a nástřiku
	A3	Vady související s plněním formy	A3.1	Studený spoj
			A3.2	Laminace
			A3.3	Broky
	A4	Nežádoucí částice	A4.1	Vměstky
			A4.2	Nežádoucí struktura
A5	Vady způsobené tepelnou kontrakcí	A5.1	Prasklina	
		A5.2	Trhlina	

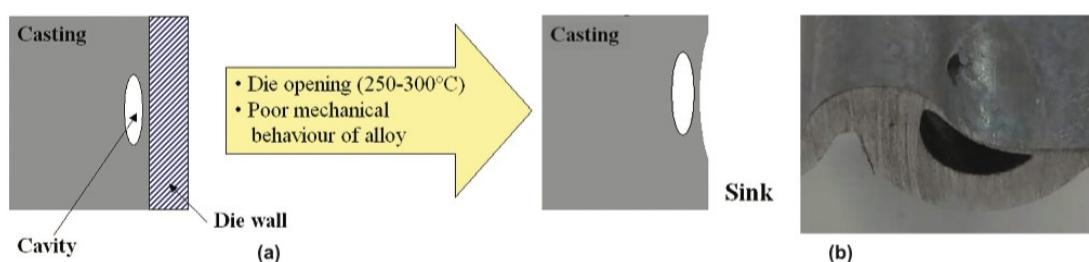
Tabulka 2. Klasifikace povrchových vad a nedokonalostí				
Úroveň I	Úroveň II		Úroveň III	
B Povrchové vady a nedokonalosti	B1	Staženiny	B1.1	Propadlina
	B2	Vady způsobené plyny	B2.1	Puchýř
			B2.1	Bodlina
	B3	Vady související s plněním formy	B3.1	Studený spoj, vír
			B3.2	Laminace
			B3.3	Broky
	B4	Nežádoucí částice	B4.1	Povrchový depozit
			B4.2	Kontaminace, vměstek
	B5	Vady způsobené tepelnou kontrakcí	B5.1	Prasklina
			B5.2	Trhlina
	B6	Interakce kovové matrice s tekutým kovem	B6.1	Eroze
			B6.2	Letování
			B6.3	Únavové tepelné praskliny
			B6.4	Stopy po vyražení
			B6.5	koroze formy

Tabulka 2. Klasifikace geometrických vad a nepřesností				
Úroveň I	Úroveň II		Úroveň III	
C	C1	Nedostatek materiálu	C1.1	Nezaběhnutí
Geometrické vady	C2	Nadbytek materiálu	C2.1	Přetoky
	C3	Mimo rozměrová tolerance	C3.1	Deformace

Tabulka 2 Víceúrovňová klasifikace neshod



Obrázek 2 (a) Vyobrazení toku kovu kolem dendritů a (b) snímek s inter-dendritickou porezitou. [13]



Obrázek 3 (a) utváření propadliny (b) propadlina je viditelná na povrchu odlitku. [13]

Tvorba makro-dendritického i inter-dendritického smršťení závisí na podmínkách plnění formy, fyzikálních vlastnostech slitiny (např. rozsah tuhnutí a smršťení), geometrii lití a procesních parametrech.

Porézní vrstva (A1.3 v tabulce 1) sestává ze sady staženin obvykle zarovnaných podél neutrální tepelné osy / povrchu odlitku. Neutrální tepelná osa / povrch se nachází v úsecích odlitků, kde je teplotní gradient nižší než sousední body. [3-4], [12], [14]

Propadlina (B1.1 v tabulce 2) je povrchová deprese související s přítomností pórovitosti smršťení pod povrchem. K tomuto druhu vady dochází během tuhnutí odlitku, když je horké místo lokalizováno v blízkosti rozhraní kov / matrice. Kůra odlitku, vytvořená v důsledku kontaktu taveniny s matricí, není schopna udržet atmosférický tlak a plasticky se deformuje (obrázek 3). Propadliny se obvykle nacházejí v součástech s relativně širokými rovnými plochami nebo ostrými změnami průřezu. [2], [13]

3.1.2 Vady způsobené plynem

Poruchy související s plynem jsou malé dutiny způsobené zachycením vzduchu nebo směsi plynů uvnitř dutiny formy. Poréznost zachycení vzduchu (A2.1 v tabulce 1) se tvoří jako sled zachycení vzduchu v tekutém kovu. Jak je znázorněno na obrázku 4a se

pórovitost vzduchu jeví jako sférické nebo elipsoidní dutiny charakterizované relativně hladkým povrchem. Dutinu obaluje tenká vrstva oxidu vzniklá v důsledku interakce mezi vzduchem a tekutým kovem při vysoké teplotě. **Vzduchové bubliny** jsou nejčastější vadou spojenou s **plynem** v technologii vysokotlakého lití. V turbulentním litém kovu se mohou vytvářet vzduchová bublinová pásma ve vstřelovacím pouzdře, na výběžích a branách nebo uvnitř dutiny formy. [2-5], [13], [20], [21], [26-38]

Vodíkové bubliny (A2.2 v tabulce 1) jsou sférické protáhlé dutiny charakterizované hladkým a identifikovaný povrchem (obrázek 4b). Takové dutiny jsou malé a v rámci odlitku jsou rozloženy téměř homogenně. Vlhkost v dutině formy nebo ve vzduchu způsobuje přítomnost mono-atomů vodíku v tekutém kovu při vysoké teplotě. V důsledku náhlé redukce rozpustnosti vodíku v pevné fázi tuhnoucí kov odmítá vodík, který tvoří bubliny poblíž rozhraní tekutý / pevný kov. Ve vysokotlakém lití se vodíkové bubliny vyskytují mnohem méně než bubliny vzduchu. To je způsobeno vysokým tlakem na tuhnoucí taveninu a zvyšováním rozpustnosti rodicího se vodíku ve zbytku taveniny, která drasticky zmenšuje velikost tvorby pórů molekulárního plynu. [3], [4], [13], [14], [17], [36], [38-42]

Porezita z výparů (A2.3 v tabulce 1) je způsobena zbytkovou vlhkostí na povrchu matrice, která se při kontaktu s roztaveným kovem stává párou. Přítomnost vlhkosti na povrchu matrice může být výsledkem přebytku lubrikantu na vodní bázi, nebo separačního nástřiku matrice.

Porezita z maziva a nástřiku (A2.4 v tabulce 1) se tvoří, když plyny vzniklé rozkladem maziva nebo nástřiku zůstávají zachyceny jako bubliny v tekutém kovu. Povrch těchto bublin se jeví tmavší než ostatní defekty související s plynem v důsledku přítomnosti produktů spalování.

Povrchové vady související s plynem jsou běžně známé jako puchýře a bodliny.

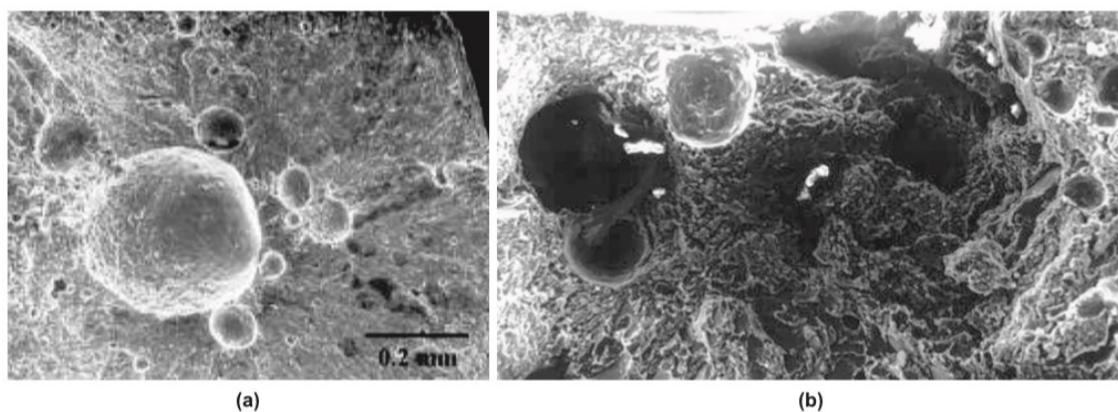
Puchýře (B2.1 v tabulce 2) sestávají z malých povrchových ploch, které vyčnívají z povrchu, když vnitřní tlak podpovrchové pórovitosti související s plynem plasticky deformuje povrch odlitku (obrázek 5a). K deformaci vrstvy obvykle dochází při relativně vysokých teplotách, kdy se odlitky vyráží z matrice, nebo při následných tepelných úpravách. [2], [13]

Bodlina (B2.2 v tabulce 2) je dutina s hladkými stěnami sférického tvaru umístěná v podpovrchových oblastech, jak je znázorněno na obrázku 5b. Bodliny jsou způsobeny

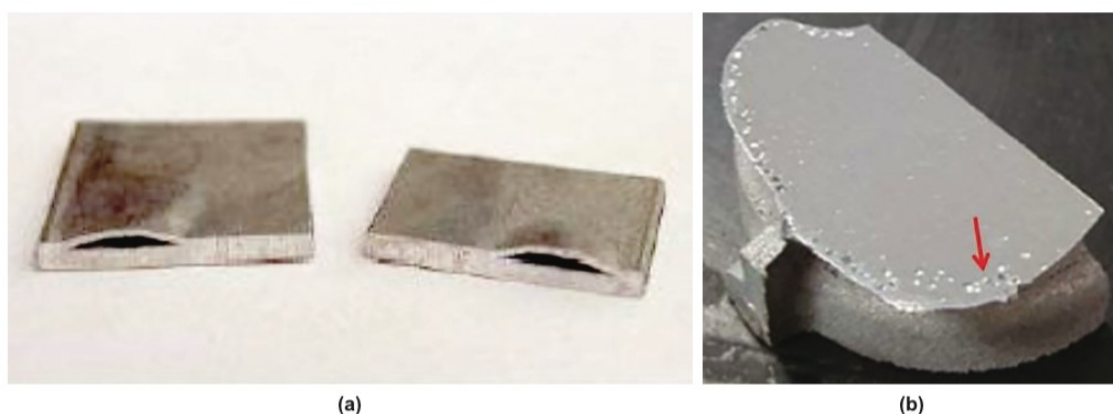
zachycením plynu v kovu během tuhnutí. Takové plyny pocházejí z vlhkosti, pojiv a přísad obsahujících uhlovodíky z pískových jader. [37]

3.1.3 Vady vznikající při plnění formy

Poruchy související s plněním jsou způsobeny anomálním tokem taveniny. Během plnění dutiny formy se mohou náhodně setkat kapalné a ztuhlé kovové toky při různých teplotách, nebo pokryté oxidovými filmy, což způsobí metalurgickou nehomogenitu. Studený spoj (A3.1 v tabulce 1 a B3.1 v tabulce 2) se tvoří, když se relativně studený nebo částečně tuhnoucí a v některých případech vrstvou oxidu pokrytý tok setká s dalším teplejším kovovým tokem, který kolem něj může proudit (obrázek 6a). Zvláštním typem studeného spoje je vír (B3.1 v tabulce 2), který se vyskytuje na povrchových částech odlitku a vykazuje charakteristické spirálové rozdělení oxidických filmů a mikrostruktury. Studený spoj a vír obvykle způsobují zlomeniny při relativně nízkém namáhání. [2], [4], [13], [23], [25], [27], [28-30], [32-34], [36], [43-49],



Obrázek 4 SEM snímek (a) vzduchová bublina (b) vodíková bublina [13],[27]

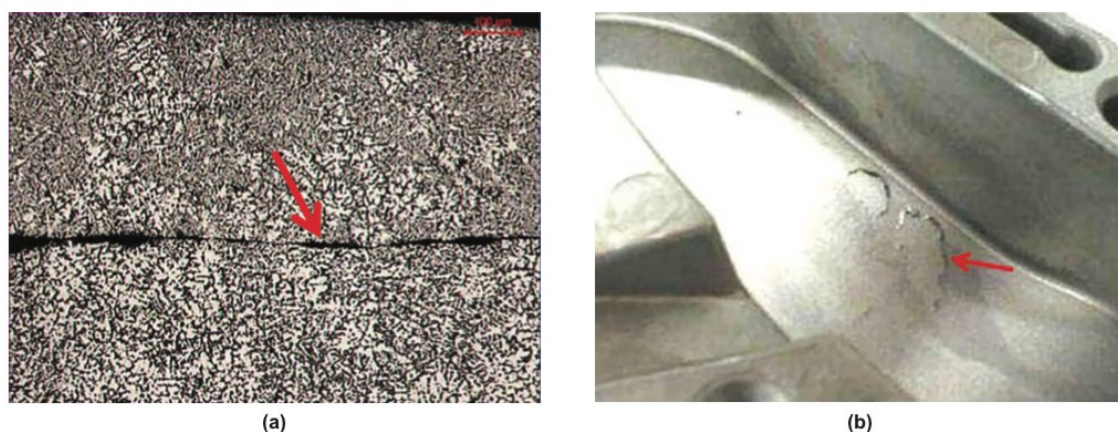


Obrázek 5 Příklady (a) puchýřů (b) bodlin [13],[37]

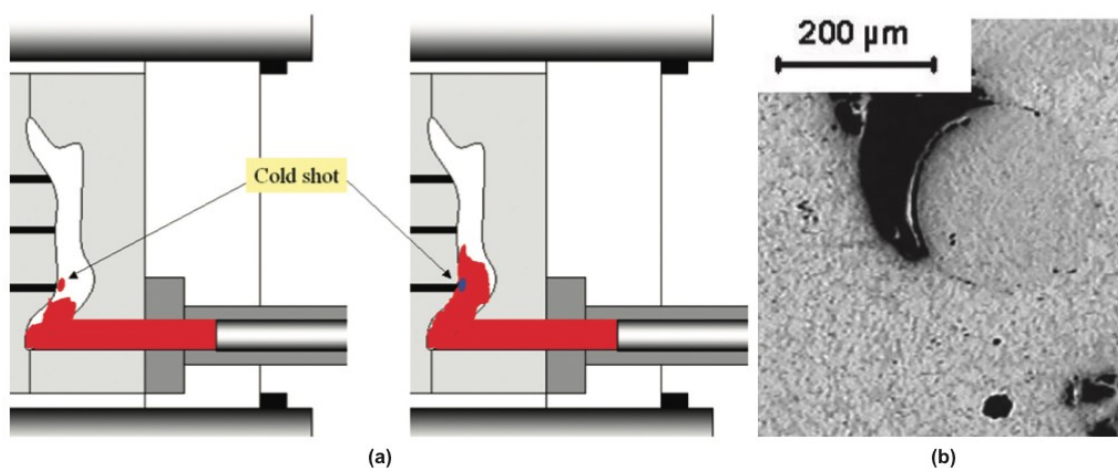
Laminace (A3.2 v tabulce 1 a B3.2 v tabulce 2) je typická závada povrchu (obrázek 6b), ale někdy také může být považována za vnitřní vadu. Jedná se o tenké vrstvení kovu na

povrchu odlitku s odlišnou mikrostrukturou od okolního materiálu, který je částečně oddělen oxidovým filmem. Laminace se tvoří, když kov přijde do kontaktu s povrchem matrice a tuhne vyšší rychlostí. [2], [4], [13], [23], [27-30], [32-34], [36], [43-48], [49]

Brok (A3.3 v tabulce 1 a B3.3 v tabulce 2) je malá izolovaná částice kovu charakterizovaná jemnější mikrostrukturou a od okolních oblastí je oddělená tenkou vrstvou oxidu, jak zobrazuje na obrázek 7b. Vzniká, když tavenina proudí turbulentně v přední části plnicí vlny, která je typická přítomností kapiček (rozstřík kovu) a přichází do styku s povrchem matrice (obrázek 7a). Za takových podmínek roztavený kov rychle tuhne. Brok je vada vyskytující se převážně ve vysokotlakém odlévání. [2], [4], [13], [23], [27-30], [32-34], [36], [43-47], [49]



Obrázek 6 Příklad (a) studeného spoje a (b) laminace



Obrázek 7 (a) Schéma utváření broků a (b) snímek broku se zachyceným vzduchem.

3.1.4 Nežádoucí částice

Některé fáze jsou nežádoucí pro svou vysokou tvrdost, tuhost, křehkost, a protože vytvářejí mikrostrukturní diskontinuity, mají za následek selhání materiálu v podobě prasklin. Intermetalické částice lze někdy identifikovat jako nežádoucí fáze.

Vměstky (A4.1 v tabulce 1 a B4.2 v tabulce 2) jsou typické nekovové fáze, které jsou tvořeny oxidy (obrázek 8a), kousky žáruvzdorných materiálů (často karbid křemíku) a struskou. V Al slitinách je nejčastějším typem inkluze hliníkový oxid Al_2O_3 . [2], [4], [13], [23], [27], [33-34], [36], [42-47], [50-52]

Nežádoucí struktura (A4.2 v tabulce 1) se skládá z místní nevhodné struktury charakterizované nízkou pevností nebo vyššími hodnotami rozestupu dendritických ramen než okolní mikrostruktura (obrázek 8b). [2], [4], [52-54] Nežádoucí fáze mohou být také umístěny na povrchu odlitků formou povrchového nánosů.

Povrchový nános (B4.1 v tabulce 2) je vrstva s různým chemickým složením, tloušťkou, distribucí a přilnavostí, která se ukládá na povrchu odlitku (obrázek 9a). Tvorba povrchových usazenin může být způsobena nadbytkem maziva nebo nástřiku.

Kontaminace (B4.2 v tabulce 2) je výsledkem interakce mezi kovem a prostředím. Dojde-li ke kontaminaci, část plochy odlitku bude mít jinou barvu než jiné oblasti, jak je znázorněno na obrázku 9b.

3.1.5 Vady způsobené tepelným pnutím

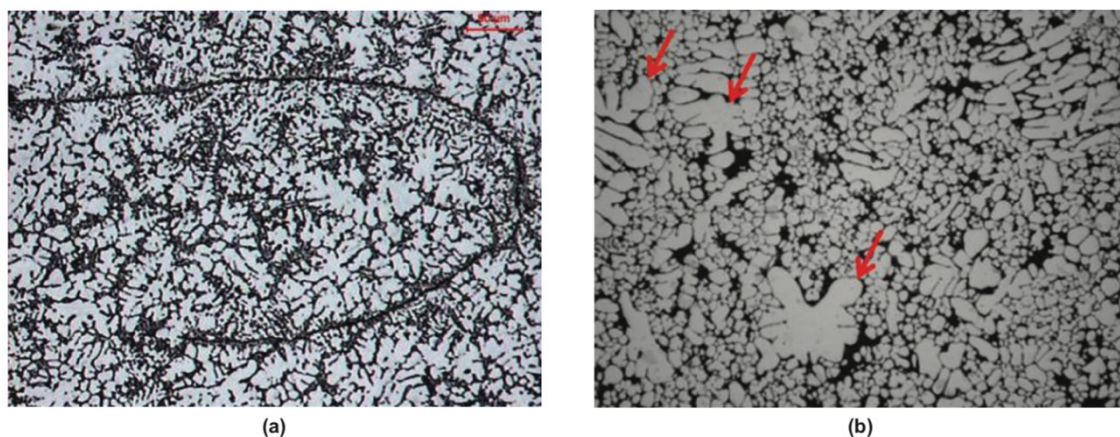
Vady způsobené tepelným pnutím sestávají z trhlin vzniklých během tuhnutí nebo ochlazování na pokojovou teplotu, kdy tahová napětí vznikající z kontrakce materiálu překračují maximální pevnost v tahu při místní teplotě kovu.

Prasklina (A5.1 v tabulce 1 a B5.1 v tabulce 2) je geometrická diskontinuita charakterizovaná jedním rozměrem mnohem menším než okolní dva, jak je znázorněno na obrázku 10a. Povrchy praskliny často vykazují transkrystalický poruchový režim. Při vysokotlakém lití se takovéto vady vyskytují při relativně nízkých teplotách hluboko pod rozsahem tuhnutí. Při těchto teplotách matrice brání tepelné kontrakci odlitku. [2],[4]

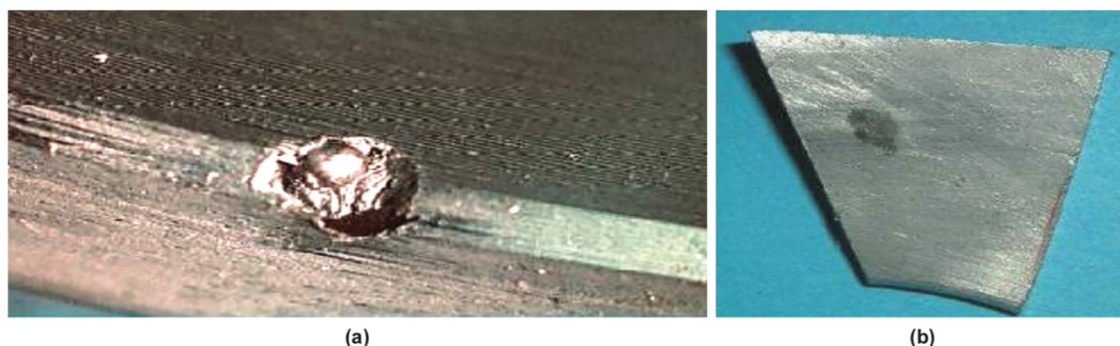
Trhlina nebo horká trhlina (A5.2 v tabulce 1 a B5.2 v tabulce 2) je trhlina vytvořená v kapalných částech kašovitě zóny během závěrečných fází tuhnutí. Povrch trhliny zobrazuje dendritickou morfologii (obrázek 10b), která je silně oxidovaná, protože se tvořila při vysoké teplotě. Tato vada se obvykle vyskytuje ve slitinách

charakterizovaných širokým rozsahem tuhnutí a v oblastech tepelných uzlů při napětích hluboko pod tahovým napětím slitiny. [2-4], [13], [55-57]

Jak praskliny, tak trhliny se často vyskytují v oblastech napětí, buď kvůli makroskopickým geometrickým důvodům, nebo kvůli přítomnosti mikrostrukturálních defektů, jako jsou plyny nebo inter-dendritická pórovitost. Protože vady způsobené tepelným pnutím mohou procházet celým odlitkem, jsou považovány za vady jak vnitřní, tak povrchové.



Obrázek 8 Micrografický snímek (a) oxidické blány a (b) region velkých dendritů obklopený jemnými. [13], [53]



Obrázek 9 Makroskopický snímek (a) zanesení a (b) kontaminace

3.2 Povrchové vady a nedokonalosti

3.2.1 Vady na rozhraní kovové matrice – tekutý kov

Vady vznikající na rozhraní tekutý kov-matrice jsou povrchové vady a jsou výsledkem nevhodných povrchových podmínek způsobených interakcí mezi kovem a matricí. Protože většina z těchto defektů je důsledkem geometrických modifikací povrchu matrice, jsou pojmenovány podle fenoménu degradace vyskytujícího se v matrici samotné, tj. eroze, letování, tepelná únava, stopy po vyrážení a koroze. Tyto defekty se často nacházejí v oblastech matrice, které jsou vystaveny natavování při relativně vysoké

teplotě a průtoku tekutého kovu. Z tohoto důvodu je lze často nalézt v technologii vysokotlakého a nízkotlakého lití.

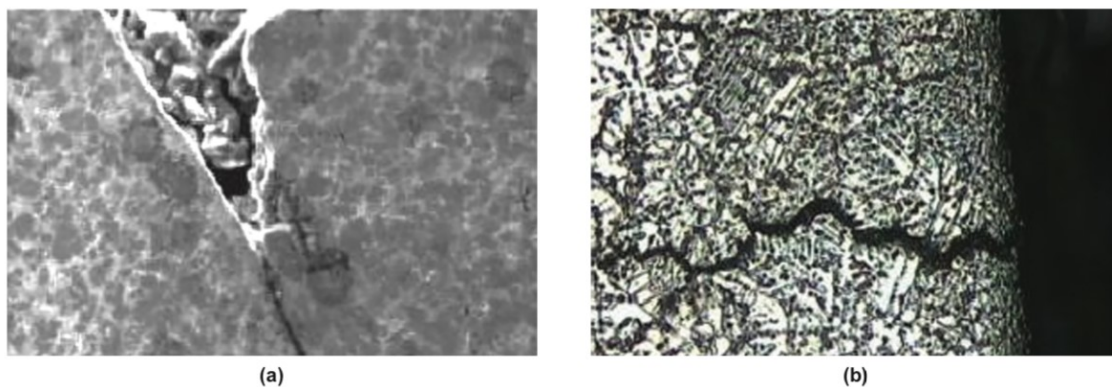
Eroze (B6.1 v tabulce 2) sestává z přebytečného materiálu na odlitku v důsledku odstranění oceli z matrice kvůli eroznímu opotřebení. Eroze závisí na úhlu sklonu mezi tokem taveniny a povrchem matrice a na přítomnosti částic nebo bublin v tekutém kovu. [2], [13], [55], [59-61]

Letování (B6.2 v tabulce 2) se jeví jako drsnost nebo lokalizovaný nedostatek materiálu na odlitku. Metalurgickým počátkem letování je tvorba intermetalických fází na povrchu matrice (obrázek 11) a následná adheze slitiny Al na tyto fáze. Letování může probíhat snadno v zónách matrice, kde již dříve docházelo k tepelné únavě nebo erozním jevům. [2], [13], [55], [58-69]

Únavové tepelné praskliny (B6.3 v tabulce 2) jsou kolekce úzkých reliéfů na povrchu odlitku, někdy nazývané „krokodýlí kůže“ (Obrázek 12). Jak se zvyšuje doba využívání formy, mohou se na okrajových částech a jejím povrchu tvořit malé praskliny v důsledku cyklického tepelného namáhání. Následně tavenina vyplní tyto praskliny, což vyústí jako hrbolky na povrchu odlitku. [2], [7], [13], [55], [59-62], [66], [67]

Stopy po vyrážení (B6.4 v tabulce 2) se jeví jako plastická deformace odlitku, která probíhá ve směru vyrážecího zařízení formy, jak je znázorněno na obrázku 13a. Tato vada souvisí s přítomností podříznutí ve formě, které může být výsledkem modifikací geometrie zápustky kvůli jednomu z dříve popsaných jevů.

Koroze formy (B6.5 v tabulce 2) vede k drsnosti povrchu odlitku v důsledku odpovídající drsnosti povrchu matrice způsobené korozí (obrázek 13b).



Obrázek 10 Mikrografické snímky (a) praskliny (b) trhliny

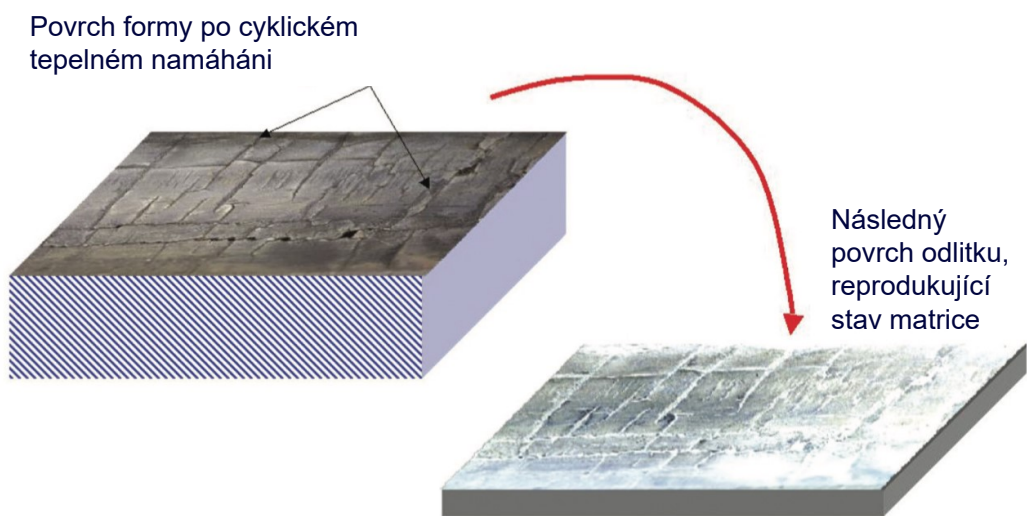


(a)



(b)

Obrázek 11 (a) Příklad formy postižené letováním a (b) její následné poškození



Obrázek 12 Schéma vlivu cyklické tepelné únavy na povrch formy a následně na odlitek



(a)



(b)

Obrázek 13 (a) Odřeniny způsobené vyrážením (b) povrch odlitku po použití zkorodované formy

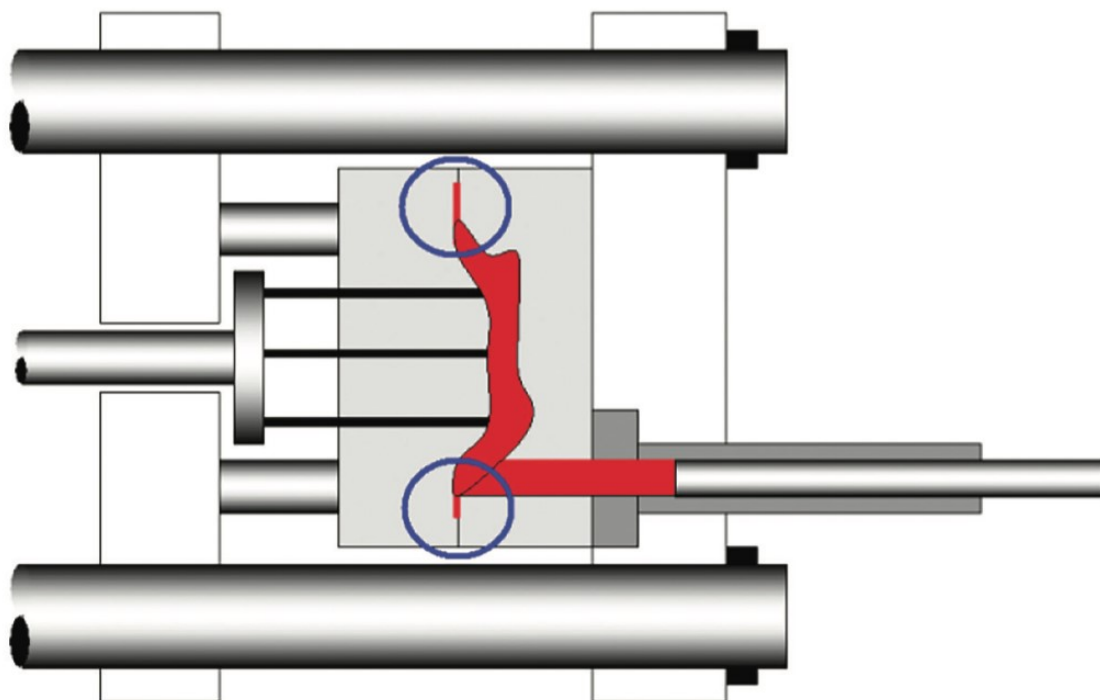
3.3 Geometrické vady a nepřesnosti

Geometrické vady způsobují nedodržení navrženého tvaru, pokud jde o nedostatek nebo přebytek materiálu mimo rámec stanovené tolerance. Tato třída vad zahrnuje nedolití, přetoky a deformaci.

Nedolití (C1. 1 v tabulce 3) ukazuje nedostatek materiálu při odlévání s ohledem na navrženou geometrii. Neúplné naplnění dutiny formy souvisí s příliš vysokou viskozitou taveniny.

Přetok (C2. 1 v tabulce 3) je přebytek materiálu na odlitku, který odpovídá infiltraci taveniny do tenké mezery mezi částmi matrice (obrázek 14). Tato vada je způsobena nedostatečnou upínací silou stroje, která nedokáže vyvážit tlak slitiny, nebo rozměrovou nepřesností formy.

Deformace (C3.1 v tabulce 3) spočívá v geometrické neshodě odlitku s jeho předpokládanou geometrií v důsledku tepelné kontrakce během chlazení. Tato vada je zřetelnější u odlitků vyražených z matrice při vysoké teplotě nebo s vysokou variabilitou tloušťky. ^[30]

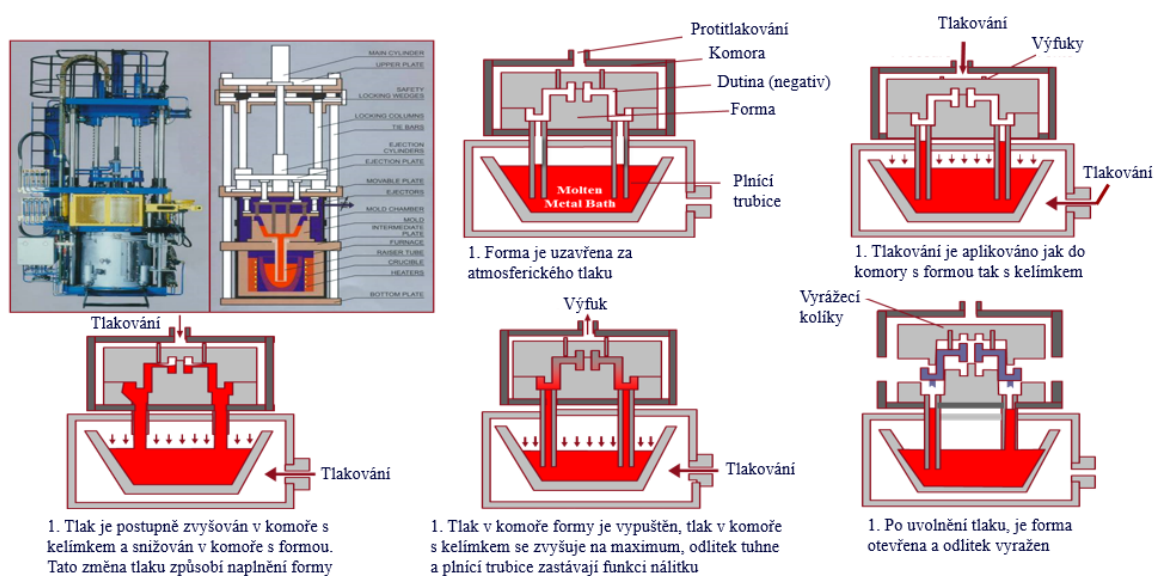


Obrázek 14 Přetoky

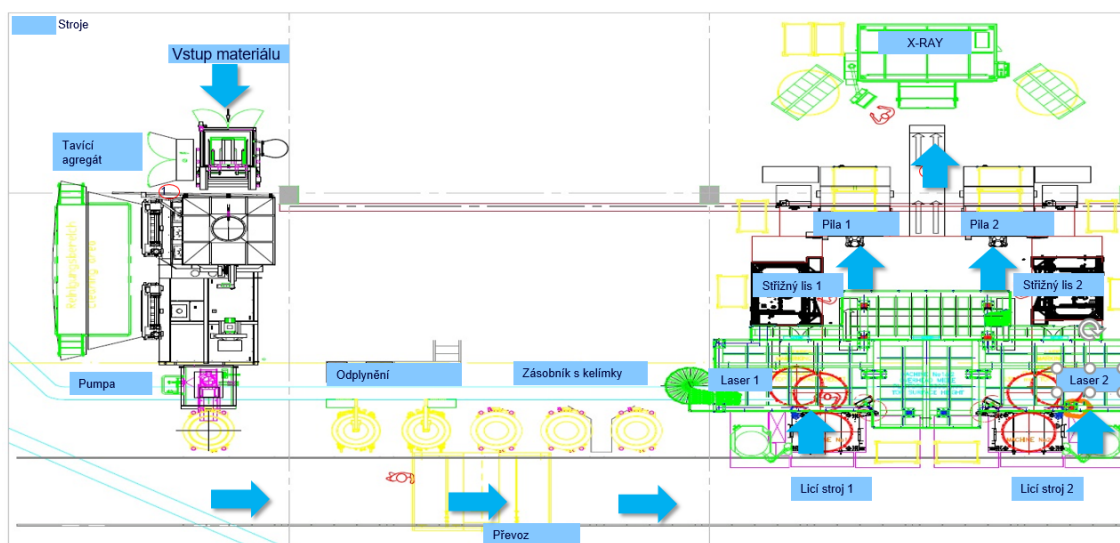
4 Nízkotlaké lící stroje CPC

4.1 Princip tlakování a plnění formy

CPC používá dvě oddělené tlakové komory. Proces začíná rovnoměrným tlakem jak v kelímku, tak v komorách formy. Tlak v kelímku se zvyšuje, zatímco se uvolňuje tlak v komoře formy. (Tlakový rozdíl je obvykle mezi 300 a 1 000 mbar.) To umožňuje, aby tavenina stoupala v plnicí trubici (trubkách) s konstantním protitlakem na povrch taveniny. Proces plnění není turbulentní a umožňuje lepší kontrolu a rovnoměrnost. Kontinuální protitlak na lící komoru také zabraňuje zavádění plynů, ke kterým obvykle dochází při plnění v jiných procesech. [71]



4.2 Rozložení linky pro lící stroj CPC



4.2.1 Tavicí pec

V tavicím agregátu se kombinuje primární a sekundární hliníková slitina, která se po přetavení udržuje na teplotě 730°C, viz příklad pece Striko Westofen (obrázek 15) navržená pro zásobování šesti licích strojů. Důležitým aspektem je rychlost dávkování tekutého kovu a schopnost zásobovat licí linku prostřednictvím kelímkových pecí. Před samotným dávkováním do kelímku se provádí chemický rozbor taveniny a případné legování.



Obrázek 15 Striko Westofen

4.2.2 Odplynění

Odplyňování znamená snižování obsahu rozpuštěného vodíku v roztavené slitině hliníku. Cílem je dosáhnout takového množství vodíku, které při tuhnutí nevytvoří bubliny, jejichž velikost nebo množství bude nepřijatelné. K odplyňování pomocí probublávání inertním plynem se používá zařízení FDU - Foundry degassing unit (obrázek 16). V případě, že se jedná o odplyňování a současně rafinaci kovu pomocí solí, je toto zařízení označováno jako MTS (Metal treatment station).



Obrázek 16 Kelímková pec a FDU

4.2.3 Chod ocelové formy

Chod nízkotlakého stroje CPC začíná zavřením formy a vyrovnáním tlaků mezi kelímkem a komorou formy. Během plnění a tuhnutí kovu ve formě zůstává komora uzavřena a v přetlaku. V konečné fázi dochází k otevření formy a vyražení odlitků do podávacího koše (obrázek 17).



Obrázek 17 Vyražání odlitků do podavače



4.2.4 Quench

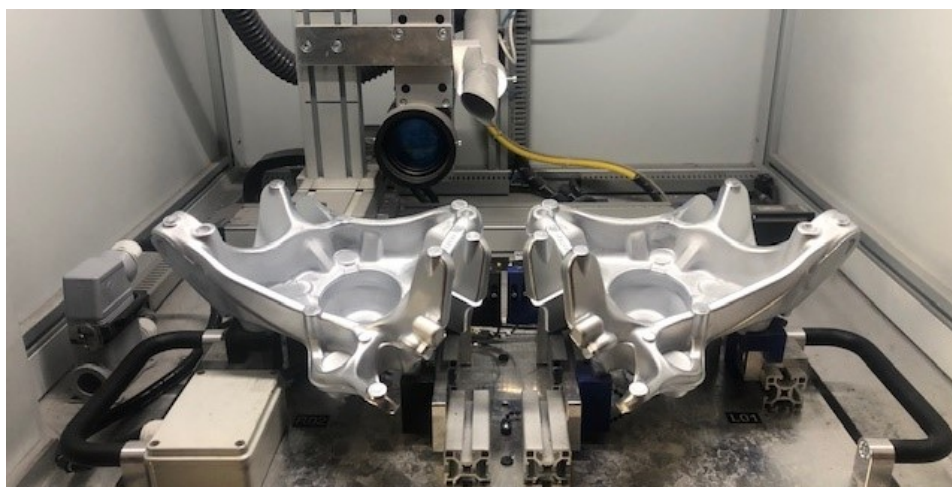
Po vyražení odlitků do podávacího koše přenesse otočné rameno odlitky do nádrže s vodou. Tento proces, anglicky zvaný „quench“ – obrázek 18, má za primární účel ochladit odlitky na vhodnou teplotu pro následující operace (vizuální kontrola, laserové značení atd).



Obrázek 18 Quench

4.2.5 Laserové označení

Na čerstvě ochlazený odlitek je v laserovací stanici (obrázek 19) ihned vypálen data matrix code, který je většinou kombinací požadavků slévárny a zákazníka. Pomocí tohoto kódu se trasuje například datum, čas nebo operace na odlitku vykonané.



Obrázek 19 Laserovací stanice

4.2.6 Střížný lis

Do lisovacího stroje se podle projektu zakomponuje kazeta (obrázek 20) s přípravkem na odstříhnutí technologických přetoků slitiny. Více o přetocích v kapitole 6.



Obrázek 20 Střížný lis

4.2.7 Pila

Na pile (obrázek 21) se odstraňují prvky vtokové soustavy, jako je vtokový kůl, takzvaná „mrkev“, anebo nálitky.



Obrázek 21 Kotoučová pila

4.2.8 X-ray

Rentgentovací stanice je poslední operací před tím, než se odlitky zavěsí na žíhací koše a jsou následně podrobeny operacím, jaké jsou tepelné zpracování, metalurgické vyhodnocení a uvolnění materiálu pro fluorescentní kontrolu, obrobení a složení dílu. Při této operaci dojde k prosvícení odlitku a odhalení vad, jako jsou staženiny anebo vnitřní porezita.



Obrázek 22 X-Ray

Aludyne INC.

4.3 O společnosti

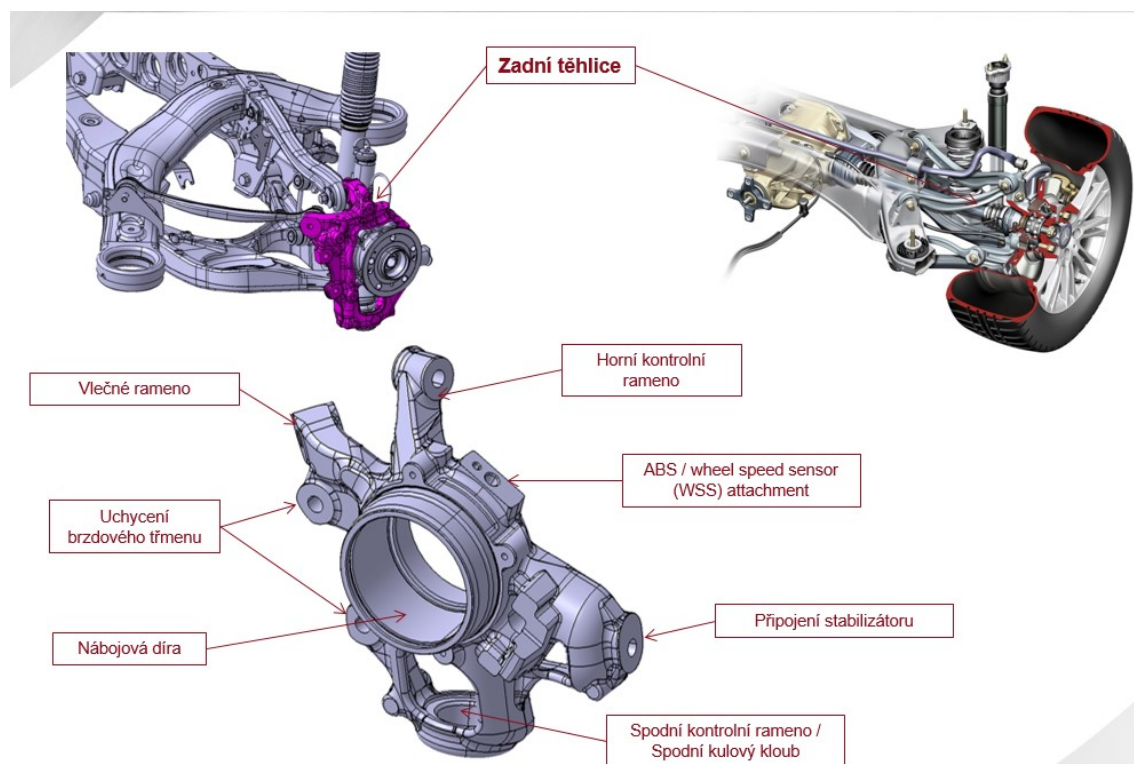
Aludyne je přední světový výrobce hliníkových a litinových odlitků a obráběných automobilových komponentů, který poskytuje zakázková konstrukční a výrobní řešení pro výrobky kritické z hlediska bezpečnosti. Využívá regionální výrobu v Severní Americe, Jižní Americe, Evropě a Číně.

4.4 Produkty

Ačkoliv společnost disponuje i slévárnou litiny s kuličkovým grafitem, její hlavní produktové portfolio tvoří podvozkové komponenty, zejména těhlice vyráběné ze slitiny hliníku. Těhlice je část nápravy automobilu, ke které jsou připevněna přední a zadní ramena nápravy, pružiny a tlumiče, hnací tyče, vozová kola, brzdová soustava a řídicí tyče u přední nápravy.

4.4.1 Zadní těhlice

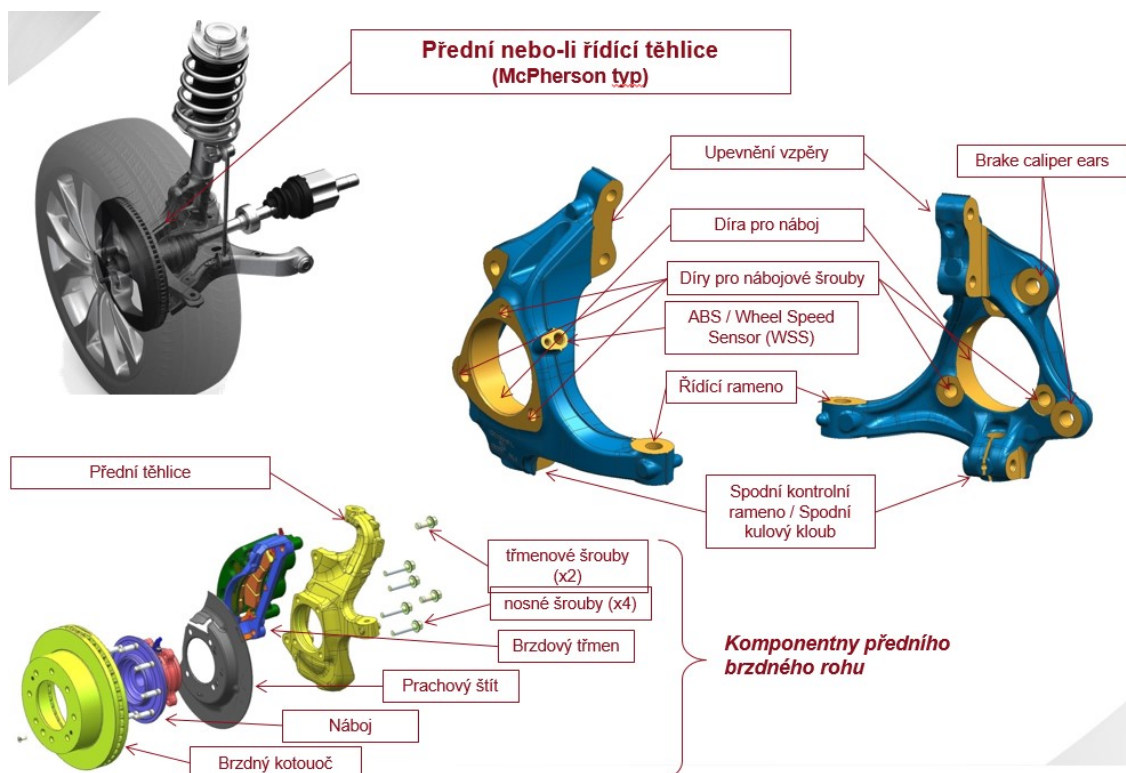
Slouží k upevnění kola na náboj v zadní nápravě.



Obrázek 23 Zadní těhlice

4.4.2 Přední těhlice

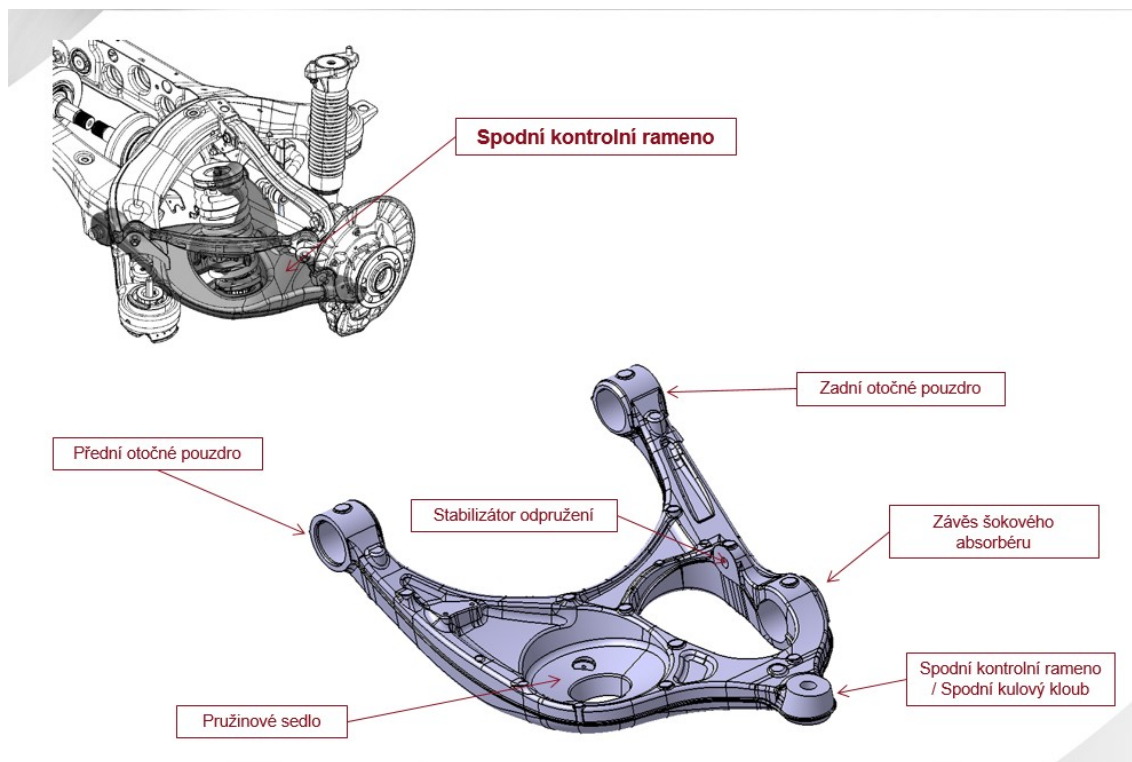
Slouží k upevnění kola na náboj v přední podvozkové nápravě.



Obrázek 24 Přední těhlice

4.4.3 Kontrolní ramena

Kontrolní ramena jsou jedním z nejdůležitějších komponentů v podvozkové soustavě. Propojují hlavní rám s nápravou, která drží přední kolo.



Obrázek 25 Kontrolní ramena

5 Praktická část

5.1 Postup vývoje odlitku

V praxi se společnost Aludyne setkává nejčastěji se dvěma typy zakázek. V prvním případě je odlitek již ve výrobě a zákazník si přeje vyrobit totožný produkt. Takto vyhraná zakázka nevyžaduje prakticky žádný vývoj, je zde jen potřeba dbát na dodržení požadavků na materiál a s tím spojené mechanické vlastnosti. V druhém případě nám na základě vyhrané zakázky zákazník poskytne takzvaný A0, neboli prvotní 3D model. 3D data jsou často předána jen jako v prostoru levitující ložiska, závity a jiné typy uchycení, na které je nutno namodelovat hmotu, která tvoří následný výrobek. Takovýto výrobek je výsledkem několika operací, jako jsou odlévání hliníkového polotovaru, stříhání a řezání vtokové soustavy a technologických přídavek, obrábění a závěrečná montáž.

Do vývoje designu produktu vstupují lidé jak ze strany zákazníka, tak výrobce. V Aludyne jsou to lidé na pozicích:

1. Produktový inženýr – zabývá se funkčností, životností a je primárním designerem finálního produktu.
2. Nástrojový inženýr – má na starost zejména vývoj a konstrukci ocelové slévárenské formy a vyrobitelnost hliníkového polotovaru po slévárenské stránce.

Správná kooperace těchto dvou pracovníků na vývoji je klíčová, protože každý z nich má jiné priority, které musí splnit. Vývoj je založený na iteracích, při kterých dochází k modifikaci 3D designu produktu, a to přidáváním nebo odebráním materiálu a následném vyhodnocení efektivity této modifikace. Jednotlivá modifikační iterace má následující podobu: Prvotní model A0, na který oba inženýři navrhnu svoji úpravu, která se na model aplikuje a následně vyhodnotí a zdokumentuje pod názvem A1. U jednoduchých produktů se počet iterací před finálním designem pohybuje mezi 30-50, u tvarově složitých může přesáhnout i 300.

Produktový inženýr musí zajistit, aby těhlice v podvozkové nápravě nepřekážela pohybu ostatním dílům, pomocí simulací ověřuje, jestli je pro danou funkci dostatečně pevná a odolná vůči cyklickému namáhání. Uvedené podněty tedy nutí produktového inženýra postupovat při designu úplně jiným směrem, než je to u inženýra nástrojového,

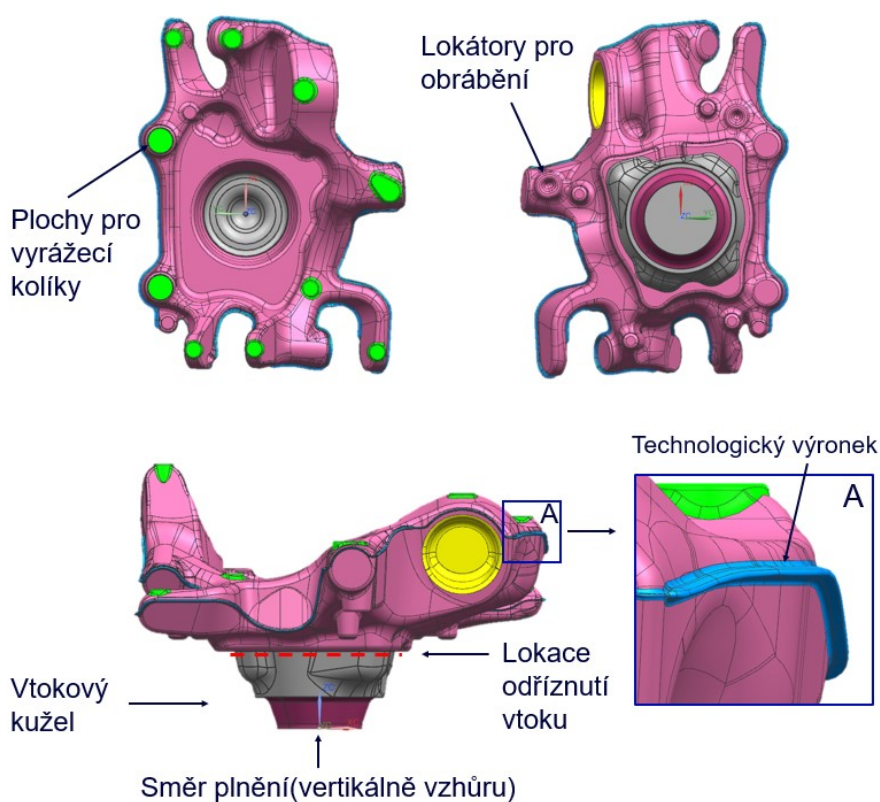
pro kterého jsou klíčové podněty, například výstupy slévárenských simulací jako plnění formy a tuhnutí odlitku v ní. Na design tedy pohlíží z hlediska usměrněného tuhnutí roztavené slitiny v dutině ocelové formy.

5.2 Konstrukce odlitku pro nízkotlaké lití

Napříč technologiemi a materiály se ve slévárenství setkáváme s tvarově různě složitými odlitky. Všechny však sdílejí stejné klíčové prvky, které ovlivňují jejich kvalitu a vyrobiteľnost. Mluvím zde o prvcích, jako jsou úkopy, minimální přípustná tloušťka stěn, zaoblení rohů a plynulé přechody.

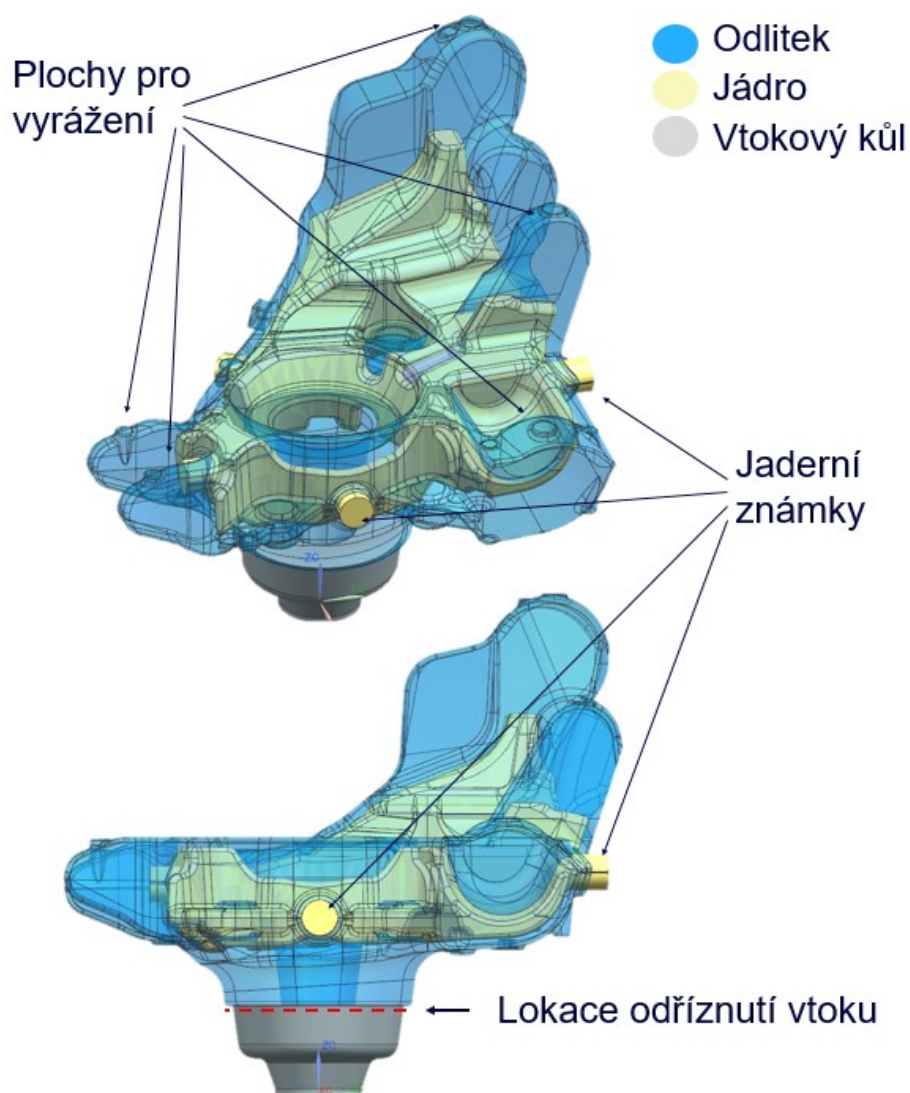
Oproti tradičnímu odlévání do pískových forem obsahuje odlitek vyrobený ve formě ocelové například plochy určené k vyrážení dílu z formy nebo technologický výronek k ostříhnutí dělicí roviny.

5.2.1 Prvky vtokové soustavy a odlitku pro nízkotlaké odlévání těhlic



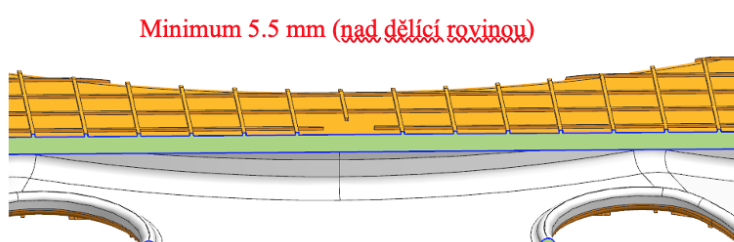
Obrázek 26 Prvky těhlice

5.2.2 Prvky vtokové soustavy a odlitku pro nízkotlaké odlévání těhlic s jádrem

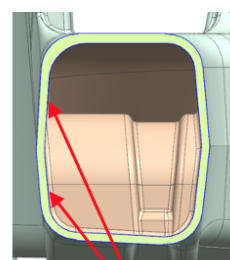


Obrázek 27 Prvky těhlice s jádrem

Při navrhování odlitku s pískovým jádrem se snažíme docílit stejné tloušťky stěn po celém jeho obvodu. Z důvodu horšího zabíhání způsobeného nižší teplotou odlévané slitiny je volena tloušťka stěn ve vrchních stěnách odlitku zpravidla o něco vyšší viz obrázek 28.



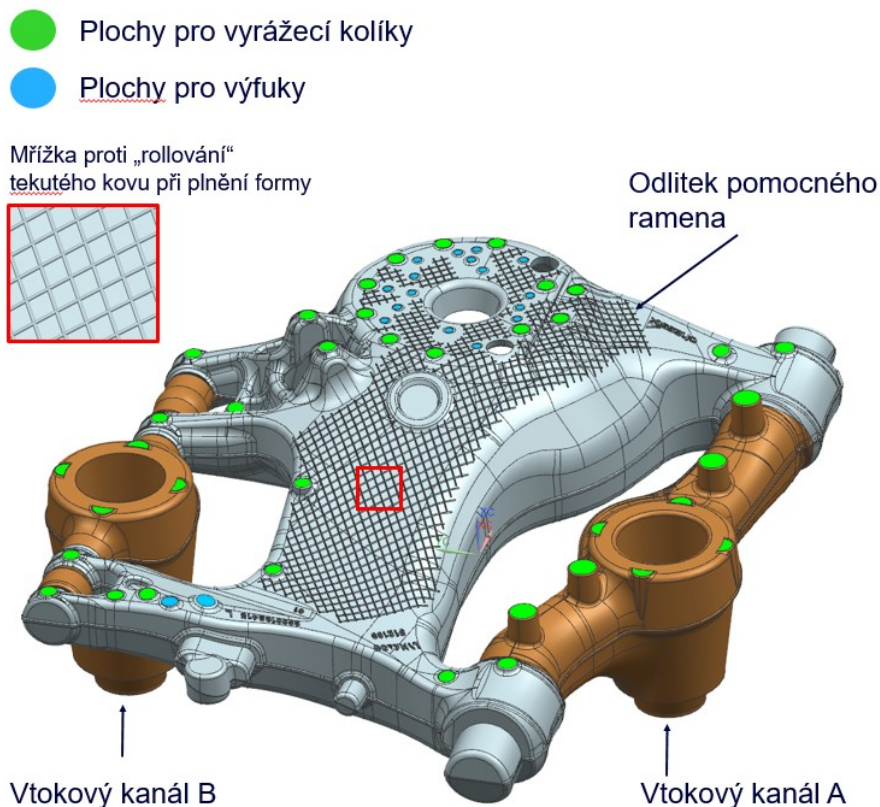
Obrázek 28 Tloušťka stěn s jádrem



Minimum 4.5 mm (pod dělicí rovinou)

Minimum 5.5 mm (nad dělicí rovinou)

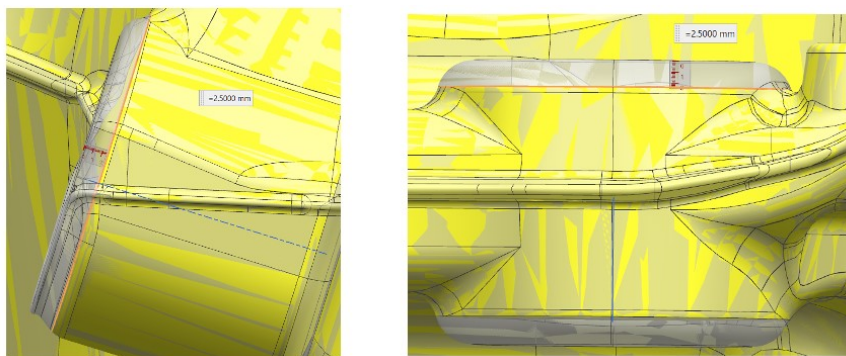
5.2.3 Prvky vtokové soustavy a odlitku pro nízkotlaké odlévání kontrolních ramen



Obrázek 29 Vtoková soustava kontrolního ramene

5.2.4 Přídavky na obrobení

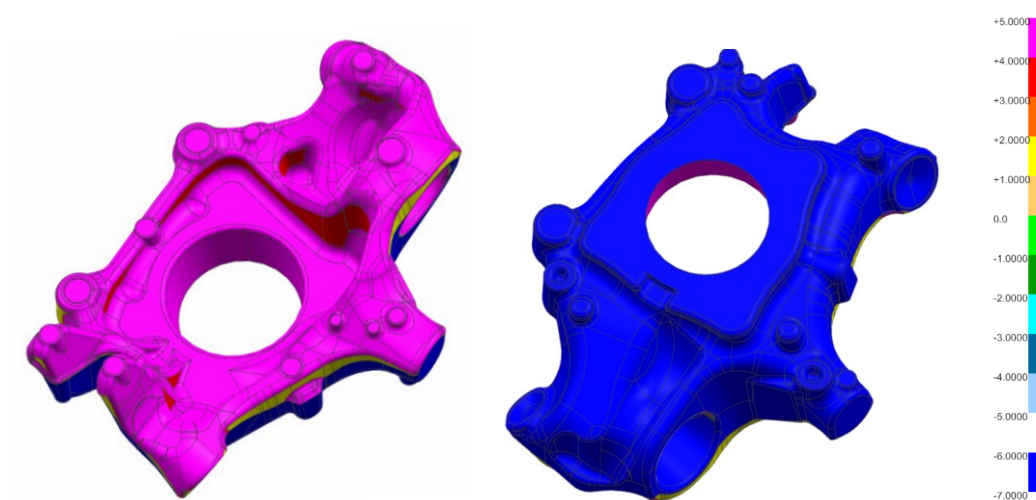
Nízkotlacc lité hliníkové slitiny využívají přídavků na obrobení o velikosti zhruba plus 2 až 3 milimetry (obrázek 30) od nominální obrobené plochy. Velikost je částečně řízená rozměrovou tolerancí, která se pohybuje kolem 1,5 mm v celém rozsahu odlitku. Správné navržení přídavku tedy do jisté míry kompenzuje rozměrové nepřesnosti na plochách výrobku v oblastech spojů, kde jsou požadavky na přesnost náročné. Přídavek na obrobení by měl být společně s odlitkem konstruován tak, aby po obrobení nezanechával ostré hrany, které by mohly poranit pracovníka při manipulaci s výrobkem.



Obrázek 30 Přídavky na obrobení

5.2.5 Technologické úkosy

Obecně úkosy slouží jako technologický prvek designu odlitku, který nám zaručí vyjmutí odlitého a ztuhlého dílu z formy. Při výrobě odlitků nízkotlakou technologií, kde je kladen vysoký důraz na výrobní rychlost, a tudíž rychlou opakovatelnou využitelnost formy, postupujeme s návrhem úkosů tak, aby v části dílu nad dělicí rovinou vznikl menší úhel úkosu než v části spodní. Zmíněný designový postup nám zaručí, aby díl zůstal ve vrchní polovině formy, ve které jsou zabudované vyrážecí kolíky, které nám po úplném otevření formy díl vyrazí do podávacího koše. Forma se zavře a celý cyklus běží znovu. Příklad technologických úkosů znázorňuje obrázek 31.

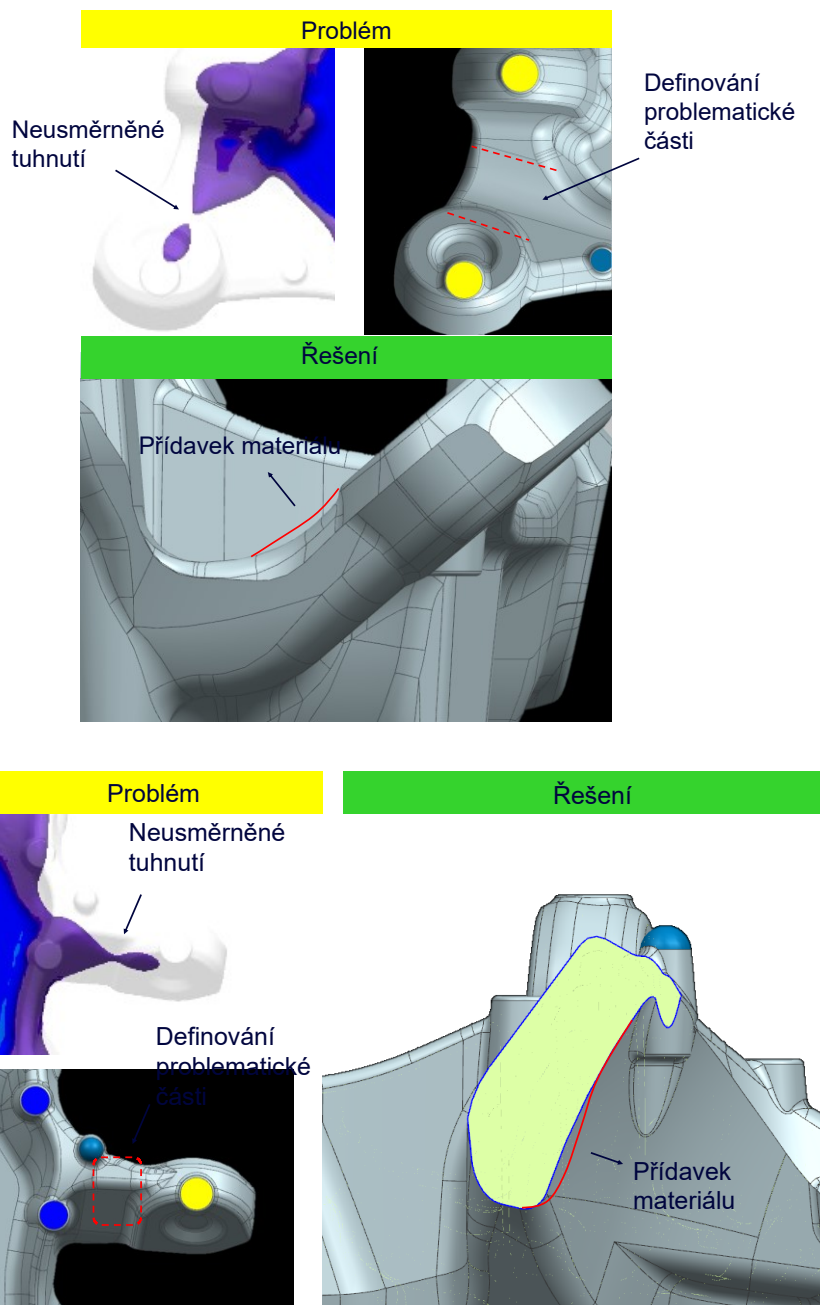


Obrázek 31 Úkosy

5.2.6 Geometrie odlitku – Usměrněné tuhnutí

Jedním z nejdůležitějších požadavků na design odlitku je správné navržení geometrie. Geometrie musí být rozložena tak, aby zaručovala usměrněné tuhnutí směrem ke vtokové soustavě. Vtoková soustava je u nízkotlakého lití většinou na spodní části odlitku, slangově „mrkev“, a funguje současně jako nálitek, který je po ztuhnutí kovu odříznut a zrecyklován. Průběh správného tuhnutí kovu znázorňuje série obrázků 32.

Při obdržení nového modelu odlitku a jeho první simulaci většinou zjistíme, že kov ve formě tuhne neusměrněně. V takovém případě se tuhnoucí kov může oddělit a izolovat v člancích dílu, což ve výsledku zapříčiňuje stahování kovu v dané oblasti místo v nálitku či vtokové soustavě. Designer je tedy nucen definovat problematické části a navrhnout postup nápravy této vady viz série obrázků 33.

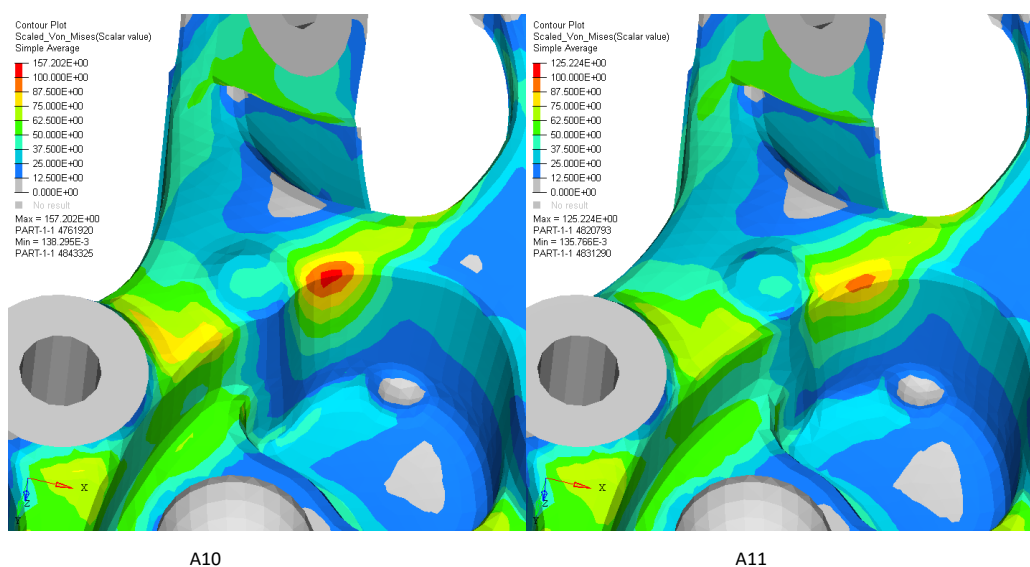


Obrázek 33 Řešení problémů s izolací tekutého kovu

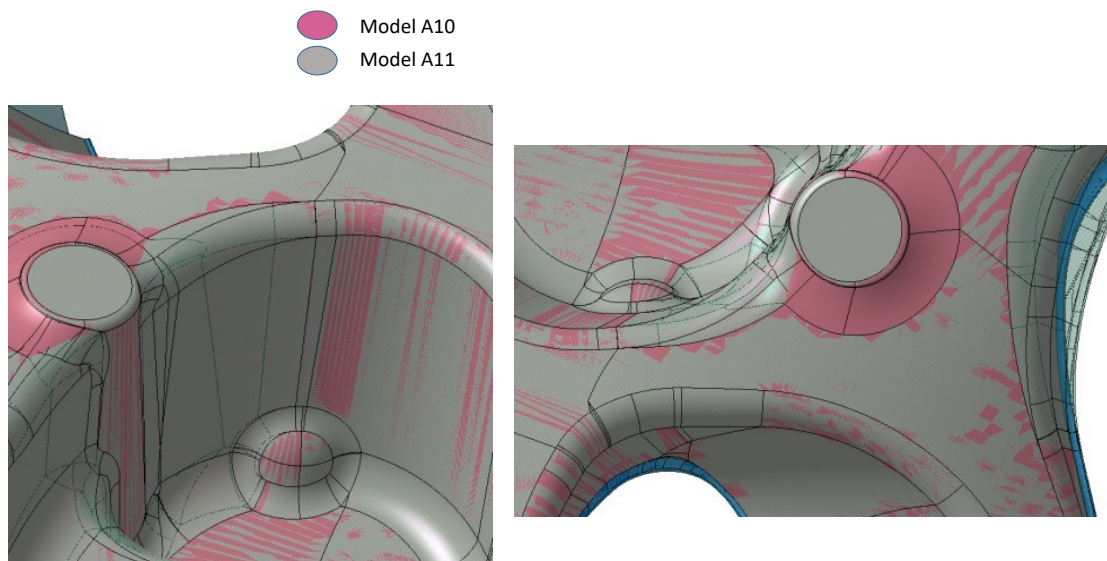
Postupovat se může i opačným způsobem, a to odebráním materiálu z oblasti před izolací tekutého kovu. To nám zapříčiní, že se zmenší celkový objem kovu, který musí postupně tuhnout směrem k nálitku nebo vtokové soustavě.

5.3 Funkčnost navrhovaného dílu

Neméně důležitým vývojovým aspektem jsou pevnostní simulace, které se definují jako určitý počet cyklického namáhání na díl. Tyto simulace, prováděné v programu ABAQUS, jsou navrženy tak, aby co nejvíce reflektovaly reálné využití a zatížení dílu. Uvádím příklad na obrázku 34, kde u iterace 10 vzniká takzvaný hot-spot, tzn. koncentrace pnutí. Na základě těchto údajů se navrhne designová změna, například přidání nebo odebrání materiálu z dílu tak, aby se hot-spot rozptýlil, nebo eliminoval. Modifikace designu pro problém zmíněný na obrázku 34, popisuje obrázek 35.



Obrázek 34 Von Misses hot-spot



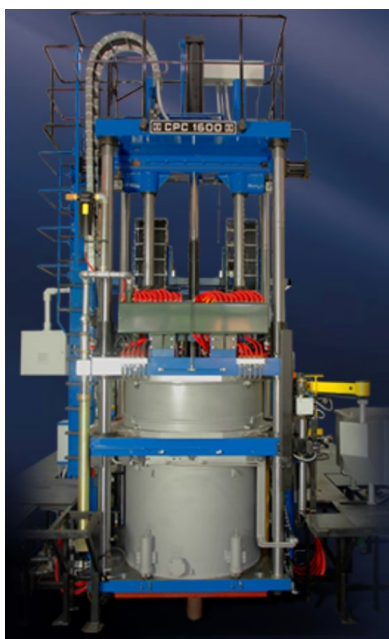
Obrázek 35 Modifikace designu

5.4 Konstrukce ocelové formy pro nízkotlaký lící stroj CPC

Ve slévárnách nízkotlakého lití se využívá ocelových trvalých forem. Oproti svým pískovým předchůdcům, které byly vyrobeny pro odlití jednoho kusu a následně rozbity a zrecyklovány, jsou schopny formy ocelové nalít cca 50 000 - 100 000 kusů. Pro zajištění plynulého chodu a dlouhé životnosti a maximální využitelnosti forem je zapotřebí, aby se při jejich návrhu dodržovala jistá kritéria. V kapitolách níže chronologicky rozeberu postup při navrhování nové formy, a to od prvotního návrhu po fyzickou formu.

5.4.1 Rozložení dílu a forem

Bulharská firma CPC – Counter pressure casting vyrábějící nízkotlaké lící stroje



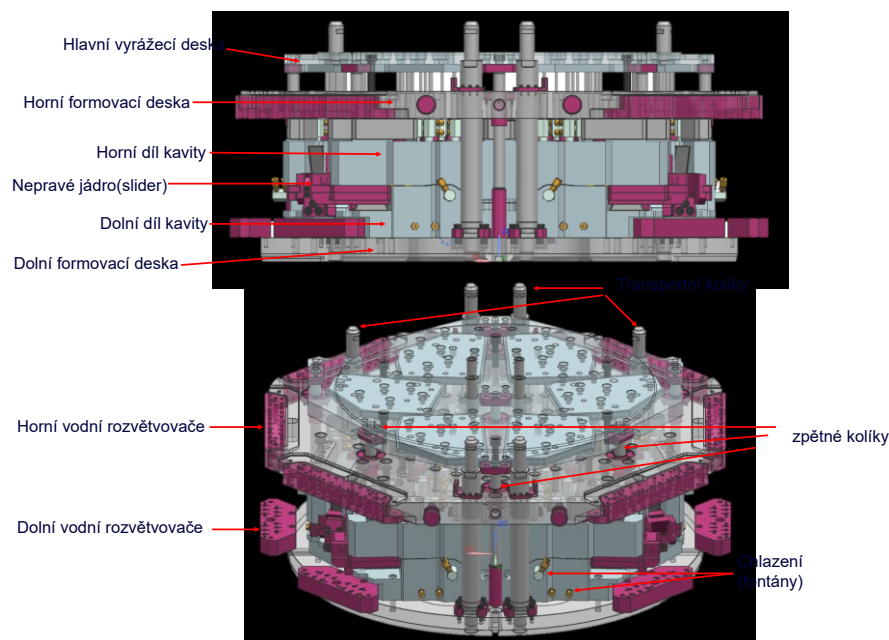
Obrázek 36 Lící stroj CPC

na bázi protitlakového lití dodává stroje o třech velikostech. Největší CPC1600, středně velký CPC1500 a nejmenší 1300. V praxi se však nejčastěji používá největší stroj CPC1600 – obrázek 36. Část formovacího zařízení, která je určená pro obsluhu forem, je kruhového půdorysu – v tomto případě 1600 mm. Je opatřena tlakovou komorou, kde se odehrává zmíněný protitlak vyvíjený na založenou formu. Samotná forma má vždy identický rám, který je ve stroji ukotven na několika bodech. Vnitřek formy, zejména kavity neboli duté vložky, se mění v závislosti na tvaru vyráběného komponentu. Kompletaci rámu a celé formy

znázorňuje obrázek 37, který obsahuje 6 kavit – 3 pro levý a 3 pro pravý kus. Levý a pravý kus dohromady dávají jeden set, stejně jako například přední levé a pravé kolo u automobilu. Počet kavit v lícím stroji se zpravidla pohybuje mezi 2-8. Tento počet je řízený buď tvarovou složitostí odlitku a vtokové soustavy, anebo požadovanou dodávkou pro zákazníka. Uvádím příklad, kde chce 1. zákazník ročně dodat 20 000 kusů a 2. zákazník 200 000 kusů. V takovém případě je na zvážení, jestli je pro slévárnu a zákazníka výhodné utratit o statisíce korun víc za větší množství kavit a zrychlit tím dodávku, anebo dodávku rozložit do celého roku.

5.4.2 Design a mechanism

Diskutovaná forma se skládá z několika komponentů, které ovlivňují její chod jak z technologicky – vliv na díl, tak mechanicky – funkčnost formy. Obrázek 38 zobrazuje klíčové prvky formy.

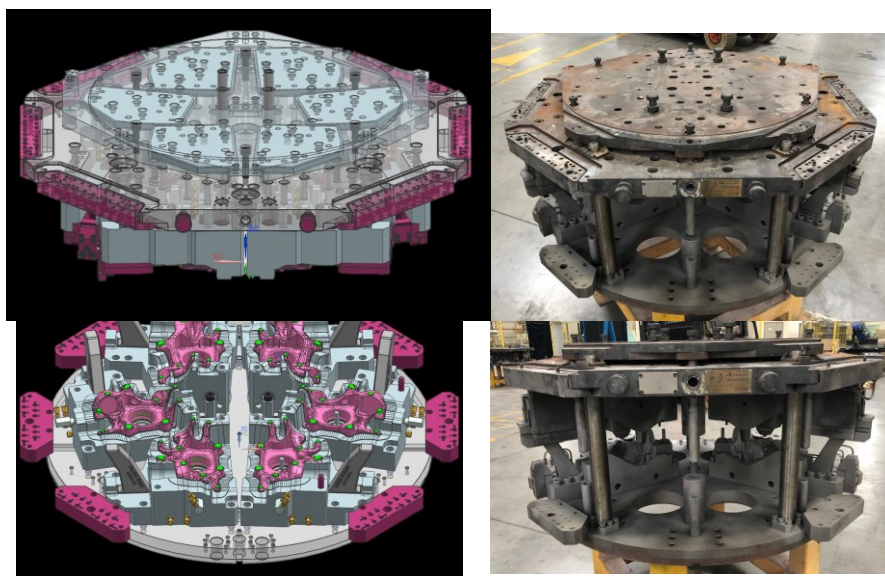


Obrázek 37 Popis formy a rámu

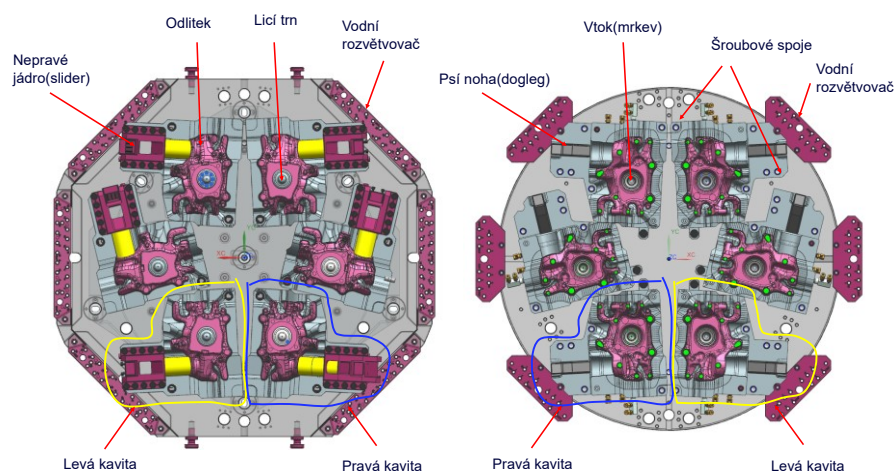
1. Hlavní vyrážecí deska – K hlavní vyrážecí desce, která je napojená na pohyblivou část lícího stroje, jsou přišroubovány dílčí vyrážecí desky pro jednotlivé kavity. Při otevření formy a zahájení procesu vyražení odlitků z vrchních kavit lící stroj zatlačí na hlavní vyrážecí desku, která přes dílčí vyrážecí desky přeneseme moment přes vyrážecí kolíky až na odlitek.
2. Horní formovací deska – Slouží primárně u ukotvení horních kavit a dalších komponentů formy.
3. Horní díl kavity – Tvoří hlavní pohledovou část odlitku nad dělicí rovinou. Je nosičem chlazení a dílčího vyrážecího systému.
4. Nepravé jádro (slider) – Tvoří boční pohledovou část odlitku, která by jinak nebyla dostupná konvenčním formováním. Slidery mohou být poháněny mechanicky nebo hydraulicky.
5. Dolní díl kavity – Tvoří hlavní pohledovou část odlitku pod dělicí rovinou. Jelikož se forma plní zespodu, je také nosičem vtoku, který současně slouží jako náletek.

6. Transportní kolíky – Dočasný prvek formy, který je používán na převoz a montáž forem do lícího stroje.
7. Horní vodní rozvětvovače – Slouží jako spojka pro přívod vody z lícího stroje a následné rozvětvení chladicího potrubí do horních kavit.
8. Zpětné kolíky – Centrují formu tak, aby vertikální chod formy byl rovnoběžný s chodem vyrážecího systému.
9. Dolní vodní rozvětvovače – Slouží jako spojka pro přívod vody z lícího stroje a následné rozvětvení chladicího potrubí do dolních kavit.
10. Chlazení formy – Je napojené na vodní rozvětvovače.

Detailnější pohled na rozložení formy znázorňuje série obrázků 39.



Obrázek 38 Forma a rám

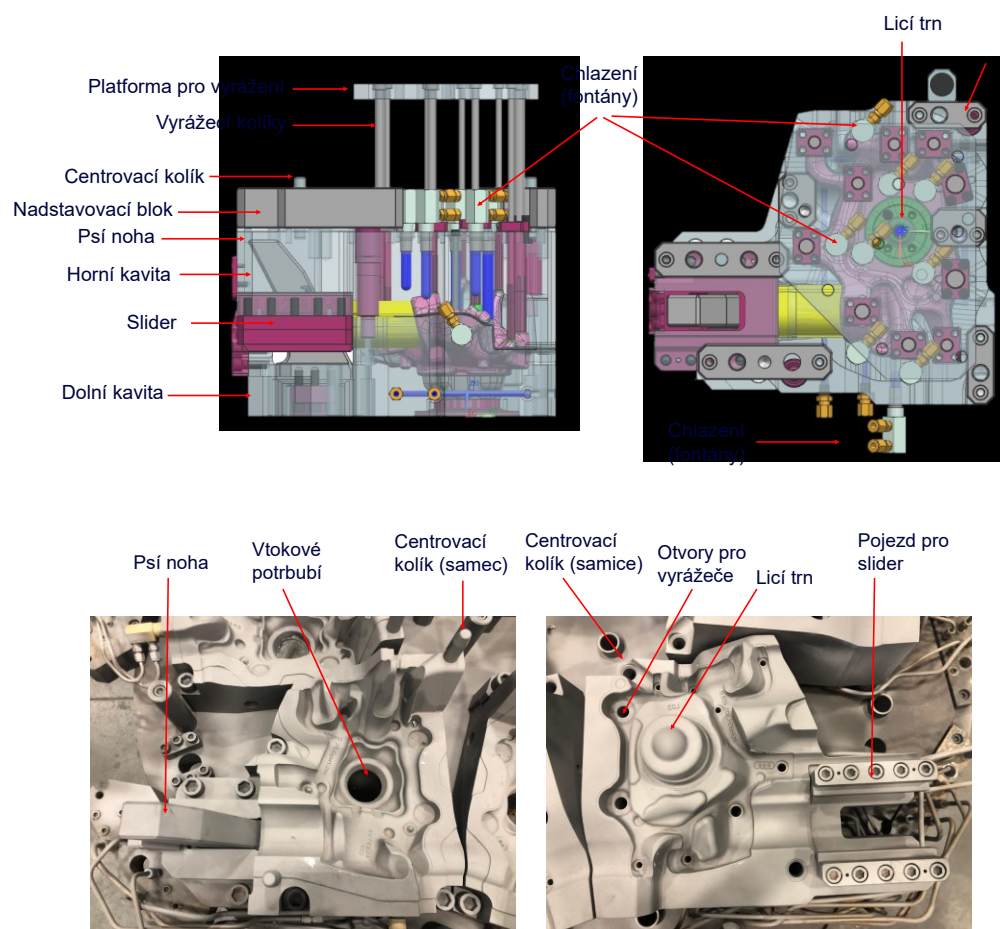


Obrázek 39 Detaily formy

11. Psí noha – slouží vyvolání pohybu slideru.

12. Lící trn – usměrňuje plnění kavit tekutým kovem.

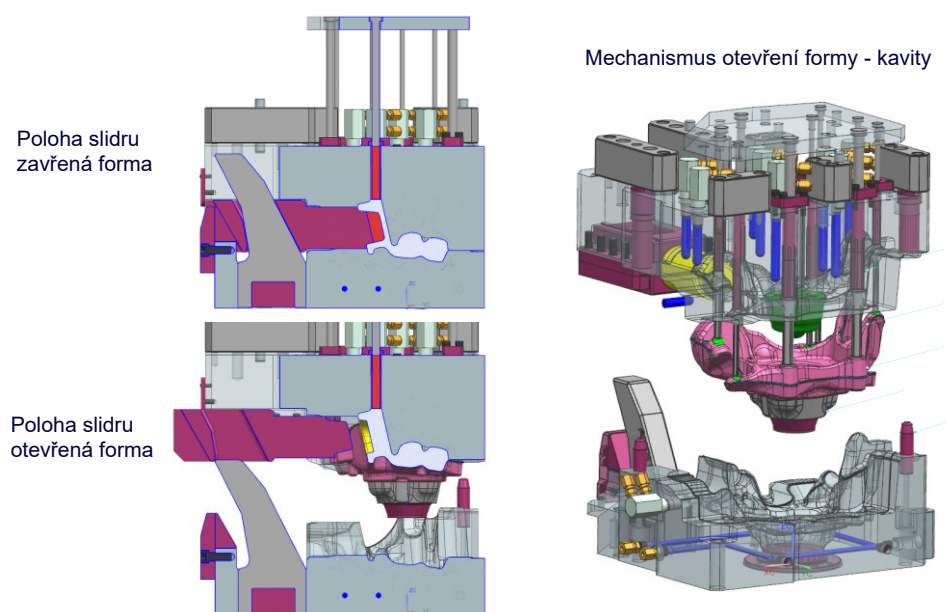
Samotná konstrukce kavity je znázorněná na obrázku 40.



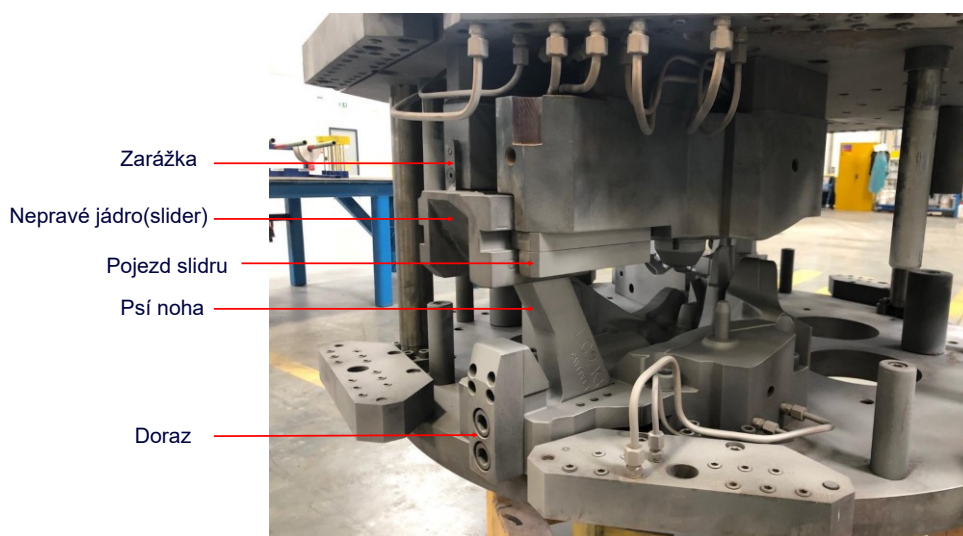
Obrázek 40 Konstrukce kavity

5.4.3 Mechanismus otevírání formy a nepravá jádra

Po naplnění a zatuhnutí kovu ve formě se spustí hydraulický systém licího stroje a formovací desky se začnou rozevírat. Horní formovací deska, která se posouvá směrem vzhůru, dorazí po pár vteřinách do maximální úvratě a z druhé strany je zatlačeno na hlavní vyrážecí desku, čímž dojde k vyražení odlitků. Současně s tímto procesem dochází k posunu bočního nepravého jádra. Zde je pohyb jader vyvolán úhlovou silou proti sobě jdoucím sliderem a psí nohou, viz. obrázek 41. Jádra používáme pouze u odlitků, kde vytvoření požadovaného tvaru nedovolí konvenční dělicí rovina. Pro srovnání s fyzickou kavitou přikládám obrázek 42.



Obrázek 41 Kavita - Jádro

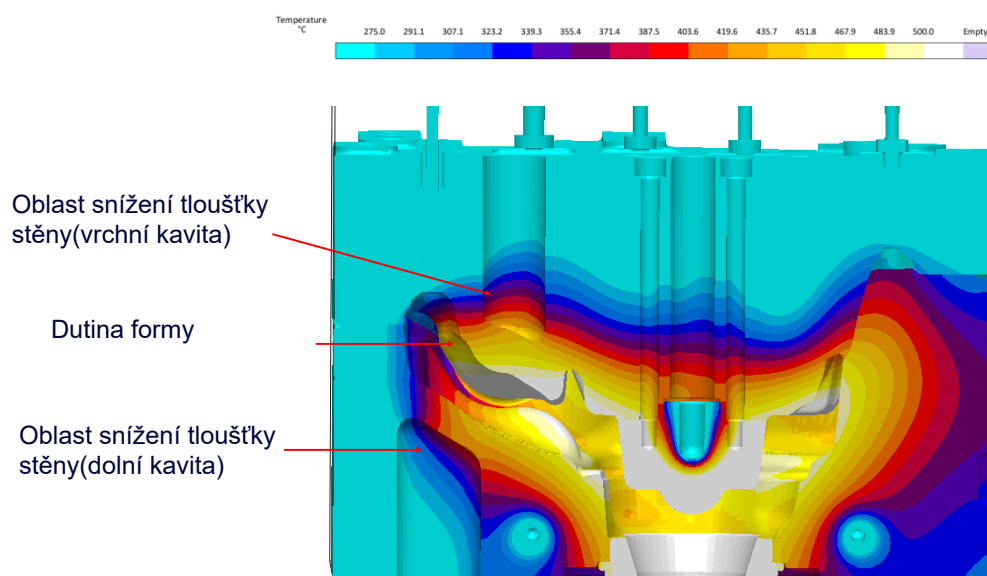


Obrázek 42 Kavita - Jádro

5.4.4 Vložky a dutiny ve formě

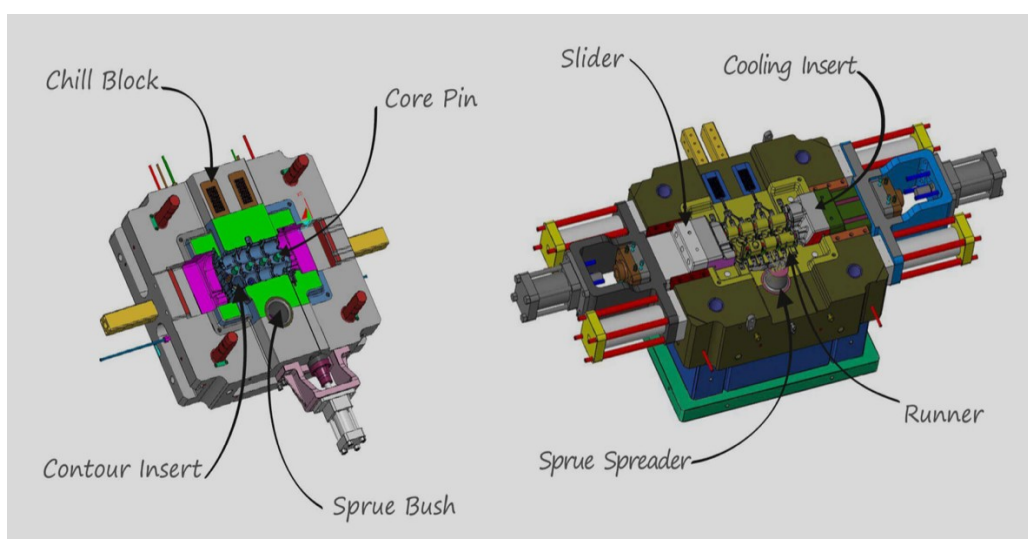
V rámci usměrněného tuhnutí roztaveného kovu ve formě se setkáváme se dvěma příklady.

1. Formu chceme přihrát: Obrázek 33 v kapitole 5 znázorňuje oblasti, kde se nám izoluje tekutý kov mimo rámec cesty tuhnutí kovu a vytváří tak staženinu. Zde problém řeším přidáním materiálu, díky čemuž dojde k prodloužení intervalu tepelného toku v tekutém kovu a staženina je tak přesměrována do oblasti vtoku/nálitku. Druhá možnost jak tento problém lze řešit, je lokální přehřátí stěn formy v problematické oblasti, viz obrázek 43. Výsledkem této modifikace formy je stejný efekt jako u přidání materiálu na odlitek, respektive tekutý materiál zůstane v oblasti teplejší a stihne tak postupovat směrem ke vtoku/nálitku. Výhodou této technologie je ušetření materiálu na odlitku a s tím spojená využitelnost tekutého kovu, anebo ve finále menší spotřeba litrů benzínu na kilometr. Modifikací formy se v tomto případě rozumí ztenčení tloušťky stěny v oblasti, kde vyžadujeme, aby se forma přehřála. Princip funguje na nedostatečném odvodu tepla do okolního materiálu formy, respektive na tom, že přenos tepla je rychlejší na rozhraní kov-kov než kov-vzduch. Materiál se nám působením opakovaného plnění formy v daném místě začne přehřívat, a tedy i odvod tepla z tekutého kovu bude pomalejší. Díky této technologii, jsme dokázali snížit zmetkovitost bez potřeby měnit současný design dílu.



Obrázek 43 Lokální přehřátí stěn formy

2. Formu chceme ochladit: Jestliže potřebujeme v problematické oblasti formu přechladit a konvenční způsob vodního chlazení není dostatečně efektivní, můžeme do soustavy formy zakomponovat materiál s vyšší tepelnou vodivostí. Jako příklad uvádím wolframový materiál Anviloy 1150. Tento materiál se používá jako koncentrátor odvodu tepla viz obrázek 44. Pro porovnání přikládám tabulku 1. Ta porovnává fyzikální vlastnosti Anviloy s ocelí H13, která se běžně využívá jako konstrukční materiál na výrobu forem. [72]



Obrázek 44 Využití prvku anviloy

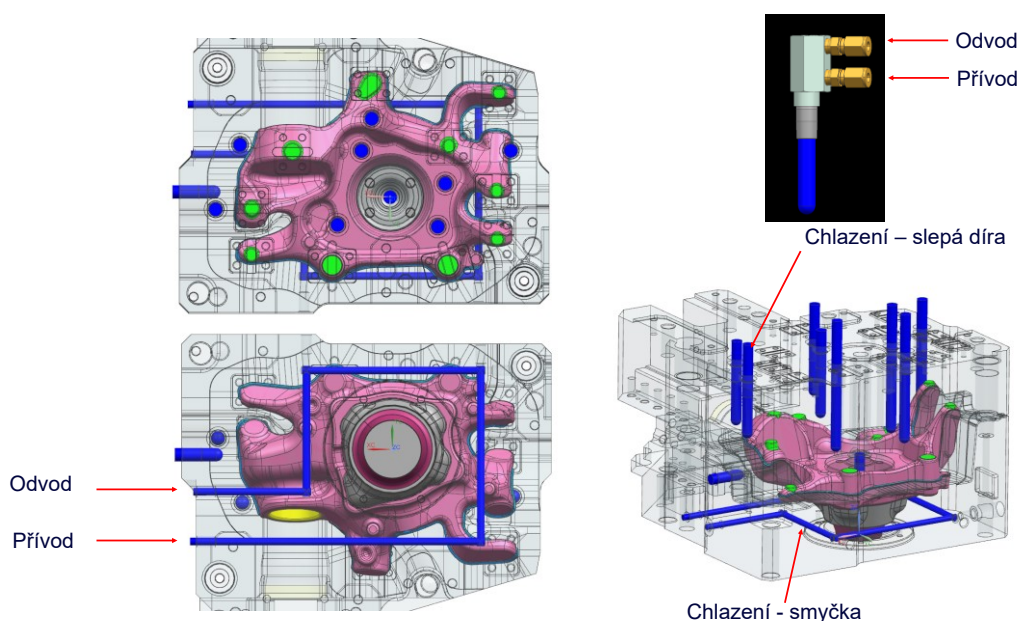
Tabulka 3 Porovnání anviloy a H13 oceli

	Hardness [HV10]	Density [g/cm ³]	UTS R _m [MPa]	Elongation A ₅ [%]	Yield Strength R _{p0.2} [MPa]	Youngs Modulus (20 °C) [GPa]	Thermal Expansion (20 ° - 400 °C) [• 10 ⁻⁶ 1/K]	Heat Conductivity λ (20 ° - 400 °C) [W/mK]
Anviloy® 1050	300	17,0	> 900	> 20	600	330	6,2	70
Anviloy® 1150	350	17,3	965	> 10	640	360	5,6	65
Anviloy® 1350	310	18,7	920	> 10	620	370	5,1	90
EN/DIN1.2344 / AISI H13	380-480	8±0,1	1230-1570	up to 40	~1200	210	11	23
EN-GIS-500-7	180-230	7,1±0,1	500	7	320	169	12,5	35,2

5.4.5 Chlazení

Formy ochlazujeme pomocí médií jako je vzduch, anebo voda. V porovnání s vodním chlazením je vzduch méně efektivní a z toho vyplývá, že je chlazení vodou ve slévárnách nízkotlakého lití nejrozšířenější. Přívod vody začíná v licím stroji, který je vybaven vodními rozvětvovači, přes ně se voda rozvětvuje do jednotlivých úseků kavit. Chlazení formy zastává hned dvě funkce:

1. Chlazení oblastí náchylných pro vznik staženin: Zde je vysvětlení přímočaré, chlazení se tedy aplikuje nad tepelnými uzly, které vznikají v oblasti odlitku.
2. Celkové ochlazování kavit: Kdybychom formu neochlazovali, došlo by k celkovému přehřátí a s tím spojené vady, jako jsou – únava materiálu a následná snížená životnost kavity, tepelná roztažnost kovu a následně netěsnost horních a spodních kavit apod. Názornou ukázkou chlazení demonstruje obrázek číslo 45.



Obrázek 45 Chlazení

V ideálním případě nám jde o to, abychom našli kombinaci výše uvedených bodů a za pomoci chlazení prodloužili životnost formy a usměrnili tuhnutí kovu. Na obrázku 45 pozorujeme dva typy chlazení.

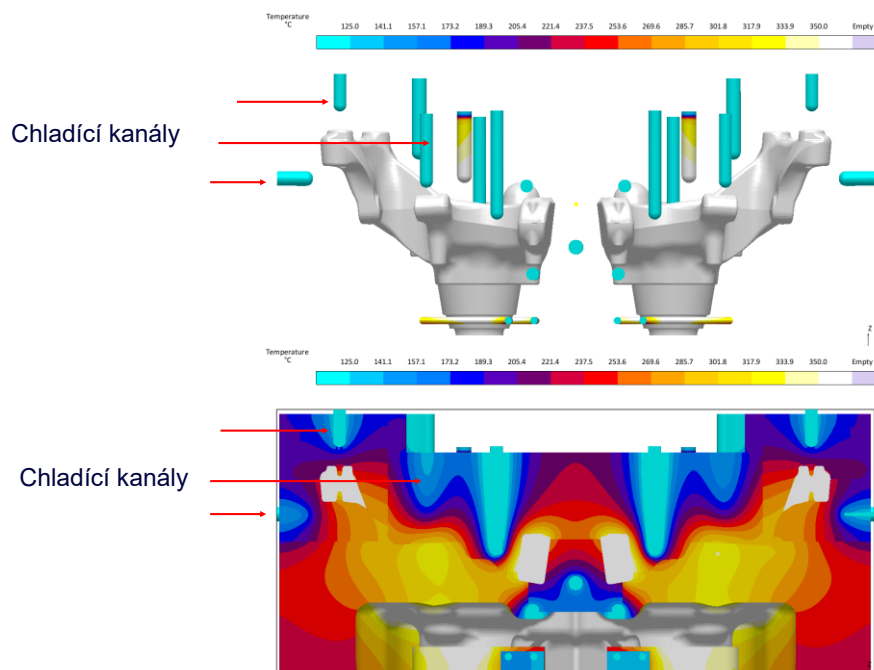
1. Slepá díra – Zde je voda přiváděna přes fontánu do díry ve formě, ve stejné díře se nachází trubka pro přívod i odvod vody.
2. Smyčka – Voda zde vstupuje do kavity jiným otvorem, než vychází. Probíhá tak dokola v uzavřeném okruhu. Zde je důležité brát v potaz, že vstupní teplota vody bude u přívodu nižší než u odvodu a s tím se bude měnit i ochlazovací účinek formy.

Důležitým parametrem je správné nastavení chladících cyklů tak, aby nedocházelo k příliš brzkému ochlazení a tím k „přiškrcení“ cesty tuhnoucího kovu. Nastavujeme tedy chlazení od nejvzdálenějších míst na odlíku směrem ke středu, viz tabulka 2.

Tabulka 4 Schéma chlazení

Material	Mat ID	Operation Time	Process Control
▼ Tempering Channel			
Tempering Channel	ID 3	Die Closed	On: 50.0 s Off: 80.0 s
Tempering Channel	ID 4	Die Closed	On: 10.0 s Off: 70.0 s
Tempering Channel	ID 7	Die Closed	On: 10.0 s Off: 100.0 s
Tempering Channel	ID 8	Die Closed	On: 40.0 s Off: 70.0 s
Tempering Channel	ID 9	Die Closed	On: 10.0 s Off: 50.0 s
Tempering Channel	ID 10	Die Closed	On: 10.0 s Off: 50.0 s
Tempering Channel	ID 11	Die Closed	On: 30.0 s Off: 60.0 s
Tempering Channel	ID 12	Die Closed	On: 50.0 s Off: 80.0 s
Tempering Channel	ID 13	Die Closed	On: 30.0 s Off: 60.0 s
Tempering Channel	ID 14	Die Closed	On: 30.0 s Off: 70.0 s
Tempering Channel	ID 15	Die Closed	On: 10.0 s Off: 100.0 s

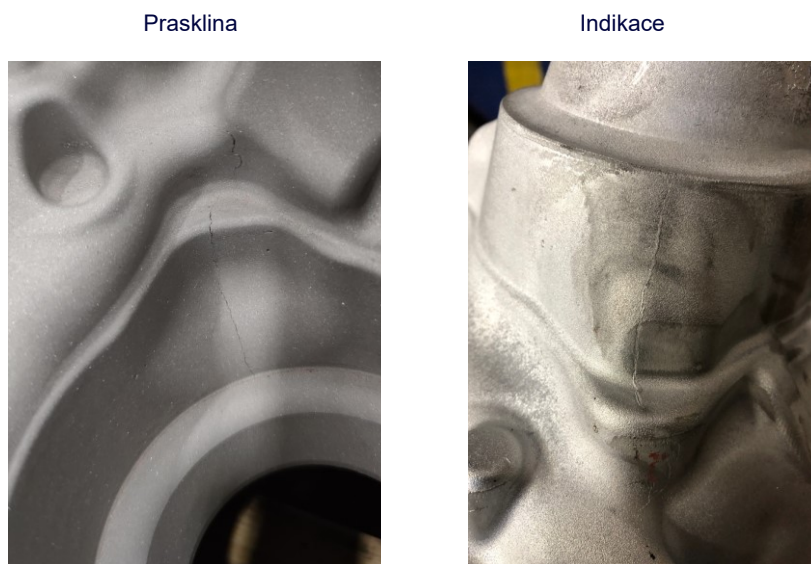
Chladicí okruh (anglicky Tempering Channel) ID 3 je přiřazen ke chladicí smyčce ve spodní kavitě. Jeho interval začíná jako poslední, a to 50 vteřin od zahájení licího procesu. Stejně je na tom i jeho „dvojče“ ID 12, které je zakomponováno v horní kavitě, přesněji v licím trnu. Prodleva na těchto dvou chladicích okruzích se nastavuje podle výsledků simulací tuhnutí odlitku ve formě tak, aby se zajistilo, že tuhnoucí kov již nemá být kde přiškrcen a se začátkem chlazení je již asimilován ve vtoku. Ostatní chladicí okruhy se dimenzují podobným způsobem, jediným rozdílem je to, že se zaobírají jinou částí odlitku než tou, která tuhne jako poslední, a to je vtok. Schéma ochlazování formy v průběhu liti znázorňuje obrázek 46.



Obrázek 46 Schéma chlazení

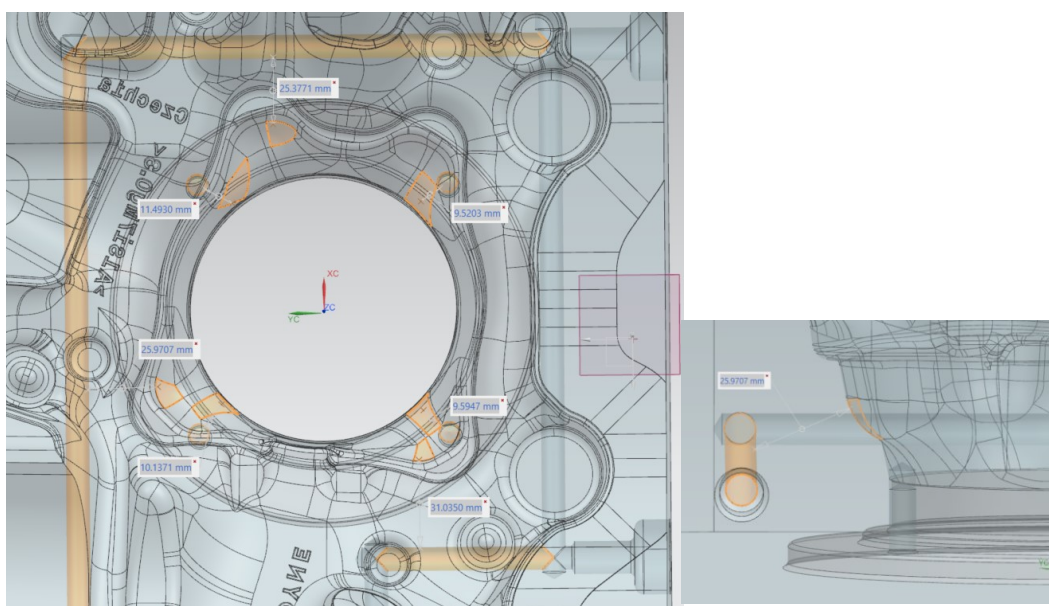
5.4.6 Pnutí ve formě a jeho eliminace

Cyklické tepelné namáhání formy způsobené neustálým přejímáním tepla z roztaveného kovu vyvolává ve formě pnutí. Koncentrátory tohoto pnutí jsou jak oblasti tepelných uzlů, tak ostré hrany formy, kde pak hovoříme o oblastech vrubového pnutí. Uvedu zde příklad, kde se nám na formě vyskytla prasklina – obrázek 47.



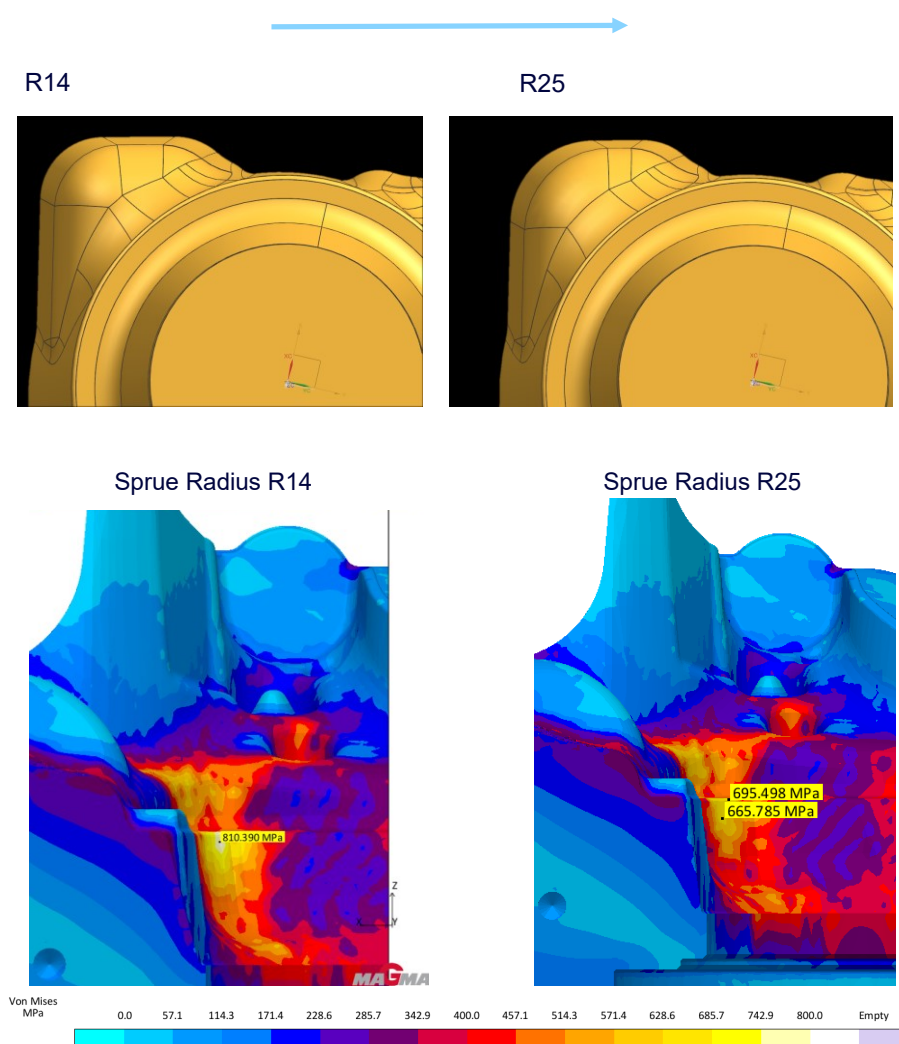
Obrázek 47 Prasklina

Prasklina se nachází v oblasti vtoku se zvýšenou působností tepelných výměn a také v rohovém tvaru kavity, připomínající tvar V. V první fázi zjišťování možné příčiny jsme se zaměřili na analyzování tloušťky stěny mezi chladicím okruhem a pohledovou stěnou kavity – viz obrázek 48.



Obrázek 48 Rozložení chlazení

Standartní síla tloušťky stěn kavit, respektive mezera mezi odlitkem a dírou pro chlazení, je 25 mm. To je zde zachováno, tudíž jsme možnost prasknutí z důvodu nedostatečné tloušťky stěny vyloučili. Závitové díry, které drží přírubu licího potrubí na spodní části kavity pod oblastí vtoku, by sice iniciovat prasklinu mohly, ale vzhledem k jejich umístění je to nepředpokládáno. Po této analýze jsem se rozhodl udělat slévárenskou simulaci deseti po sobě jdoucích odlévaných cyklů, kde jsem se zaměřil na vývoj Von Misses pnutí v oblasti praskliny. Výsledkem tohoto experimentu bylo zjištění, že pnutí zde dosahuje až o 150 MPa víc, než je náš doporučený interní limit, viz obrázek 49. Na základě této simulace jsem navrhl modifikaci tvaru vtokového systému, a to rozšíření rádia v oblasti praskliny z R14 na R25, viz obrázek 49.



Obrázek 49 Zvětšení radia na vtokovém kůlu

Tato studie jednoznačně prokázala, že je potřeba při navrhování dalších forem a odlitků postupovat obezřetněji v oblasti vtokových systémů a tím zabránit podobnému problému budoucích projektů.


6 Uvedení formy do provozu - vzorkování

Při uvedení formy do provozu se setkáváme s řadou problémů, které řešíme ve fázi zvané vzorkování. Jedná se o před produkci dílů, které ještě nejsou určené pro zákazníka, ale slouží o odladění zejména procesu lití. Jako příklad uvádím zahájení produkce zadní těhlice pro nejmenovaného německého výrobce automobilů. Tato těhlice při prvních licích testech vykazovala následující vady: přetoky, nedolítí a studené spoje. V této finální kapitole znázorním řešitelnost uvedených problémů včetně jejich vyhodnocení.

6.1 Problém s přetoky

Při nastavování licího stroje a jeho plnicího profilu většinou vycházíme z kombinace dvou faktorů. Tím prvním jsou zkušenosti s minulými projekty, tím druhým je výstup simulačního programu. Navzdory tomu se při „nájezdu“ nové formy můžeme setkat s problémy vznikajícími právě nesprávným nastavením plnicí funkce formy. Jinými slovy můžeme konstatovat, že plnicí funkce je příliš rychlá anebo silná. Forma podrobená nevhodným plněním nám vykazovala značně velké přetoky (obrázek 50) v oblasti dělicí roviny, tyto přetoky jsou nežádoucí vzhledem k obstrukcím při následném zpracování (manipulace, střižný lis apod.).

Řešením zde bylo postupné snižování licí rychlosti, dokud se přetoky nezměnšily do požadované tolerance.

	SP4 (190-16) -> (190-14) {7.22mb/s}
	SP4 (190-14) -> (190-15) {6.5mb/s}
	SP4 (190-15) -> (190-16) {5.91mb/s}
	SP4 (190-16) -> (190-17) {5.41mb/s}

Obrázek 50 Přetoky na odlévaném dílu

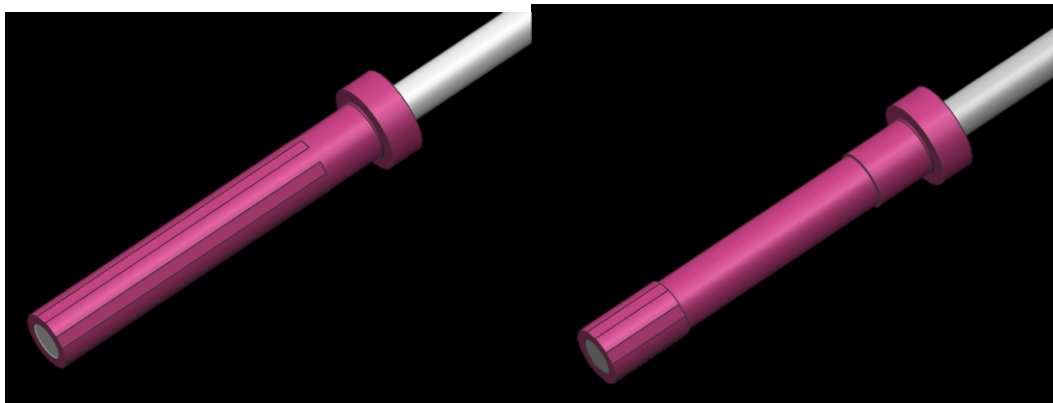
6.2 Problém s nedolitím

Nedolití může být způsobeno hned několika příčinami. Mezi ty nejčastější patří nízká provozní teplota formy, špatné tlakování a rychlost plnění formy, špatné odvzdušnění. Ideálním prostředím pro výskyt nedolitých částí na odlitku je kombinace výše uvedených příčin. Na obrázku 51 je znázorněno nedolití v nejvyšších místech na odlitku, tato problematická místa reagovala pozitivně na zvýšení lící rychlosti, problém to však nevyřešilo a vzhledem k přechozímu problému s přetoky byl tento postup nevhodný. Další možnost jak tento problém řešit, byla intenzifikace odvzdušnění formy. Toho se docílilo zvýšením výfukového prostoru, který se nachází na ploše pro vyražení odlitku, viz obrázky 52 a 53. Toto řešení problém s nedolitím v daných oblastech dramaticky změnilo k lepším výsledkům, viz tabulka 4, která je na konci této kapitoly.



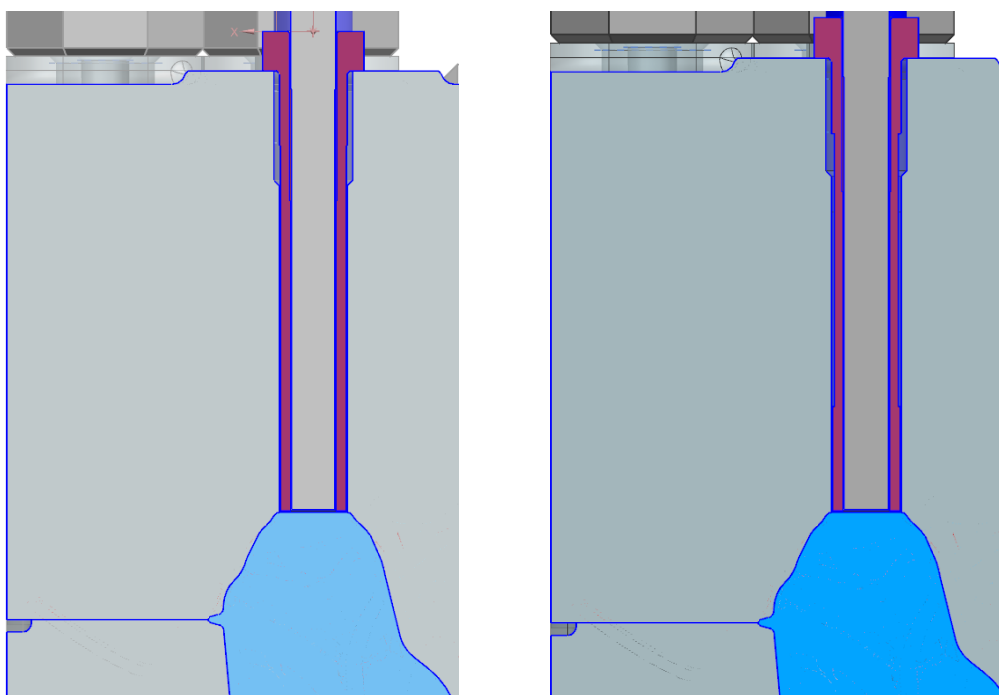
Obrázek 51 Oblasti nedolití

Soustružení kovové vložky



Obrázek 52 Zvětšení prostoru pro výfuk vzduchu

Soustružení kovové vložky



Obrázek 53 Zvětšení prostoru pro výfuk vzduchu

6.3 Problém se studenými spoji

Studené spoje vznikají v oblastech, kde se potkává jedna fronta tekutého kovu s druhou, zejména pokud je tekutý kov již studený resp. dosahuje teplot nižších 600°C. Většina studených spojů vzniká v oblasti tenkých žeber, viz obrázek 54. Výskyt studeného spoje má tendenci opakovat se na stejném místě, v tomto případě je vyvolán nízkou teplotou kovu a jako efektivní řešení se naskytlo změnit druh nástřiku formy z Dycote D 39 na Dycote D 34, viz tabulka 3.



Obrázek 54 Studený spoj

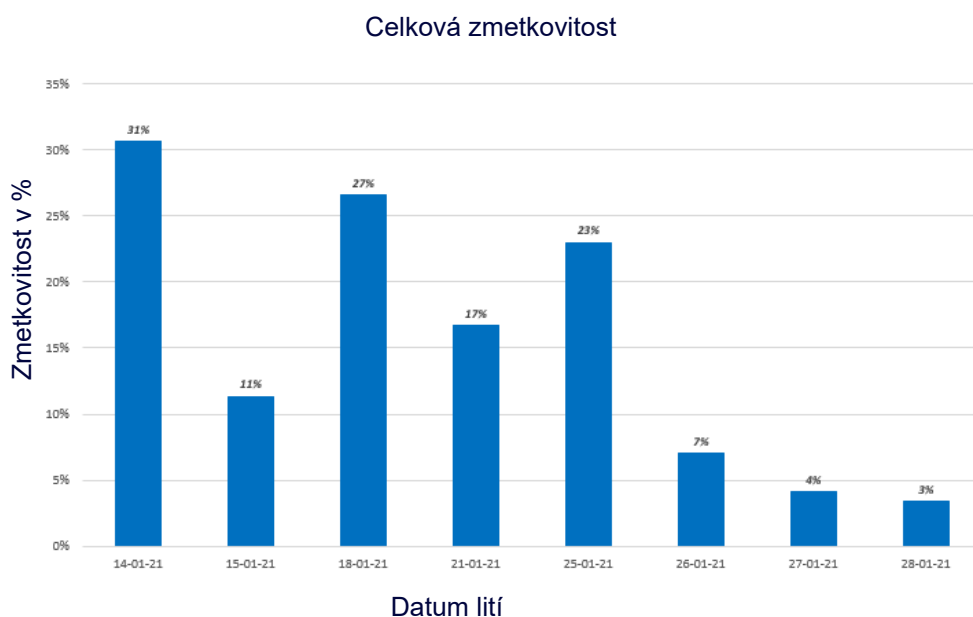
Tabulka 5 Specifikace nástřiků DYCOTE - zdroj FOSECO

Technické údaje

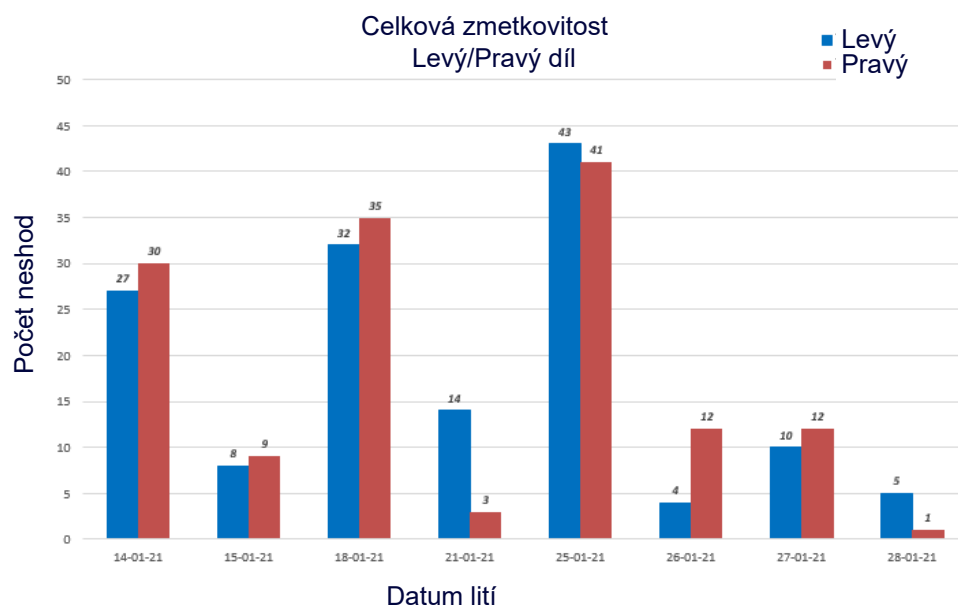
Typ nátěru	Velikost zrn	Poměr ředění	Použití, Popis
Základní nátěr			
DYCOTE DR 87	25μm	1:1-1:3	Základní nátěr pro všechny aplikace, při 180°C
Izolační nátěry			
DYCOTE 39 and DYCOTE 39 ESS	5μm	1:3-1:5	Malá izolace, velmi dobrý povrch. Verze ESS s přídavkem pojiva.
DYCOTE D 39 and DYCOTE D 39 ESS	15μm	1:3 - 1:5	Litá kola, všeobecné použití. Verze ESS s přídavkem pojiva.
DYCOTE D BN 120	35μm	1:10 - 1:20	Nátěr s obsahem nitridu boritého pro hladké povrchy a dlouhou životnost.
DYCOTE D BN 130	50μm	1:10- 1:20	Velmi dobrý povrch a dlouhá životnost. Obsahuje nitrid boritý.
DYCOTE D 7039	78μm	1:3 - 1:5	Litá kola, horní část formy a jádra; válce s žebrováním.
DYCOTE D BN7039	78μm	1:3 - 1:5	Hrubozrný nátěr, obsahuje nitrid boritý.
DYCOTE F 140	35μm	1:3 - 1:5	Vynikající izolační vlastnosti.
DYCOTE 140 and DYCOTE 140 ESS	30μm	1:3 - 1:5	Všeobecné použití. Verze ESS s přídavkem pojiva.
DYCOTE 32 ESS	30μm	1:3 - 1:5	Středně izolační nátěr, účinný pro litá kola.
DYCOTE 34 and DYCOTE 34 ESS	80μm	1:3 - 1:5	Velmi vysoce izolační nátěr pro tenkostěnné odlitky speciálně pro automobily. Verze ESS s přídavkem pojiva.
DYCOTE D 34 and DYCOTE D 34 ESS	80μm	1:3 - 1:5	Vysoce izolační nátěr pro tenkostěnné odlitky typické pro automobily. Verze ESS s přídavkem pojiva.
DYCOTE 3480	75μm	1:3 - 1:5	Jako DYCOTE 34 ESS ale, s modifikovaným vylepšeným pojivem.
DYCOTE F 34	50μm	1:3 - 1:5	Všeobecné použití.
DYCOTE D 5	45μm	1:3 - 1:5	Všeobecné použití.
DYCOTE D 6 ESS	85μm	1:3 - 1:5	Velmi vysoce izolační nátěr pro tenkostěnné odlitky. Texturovaný povrch odlitku.
DYCOTE D 6 ESSB	85μm	1:3 - 1:5	Jako DYCOTE D 6 ESS + extra pojivo.

6.4 Overení kokily a vývoj zmetkovitosti

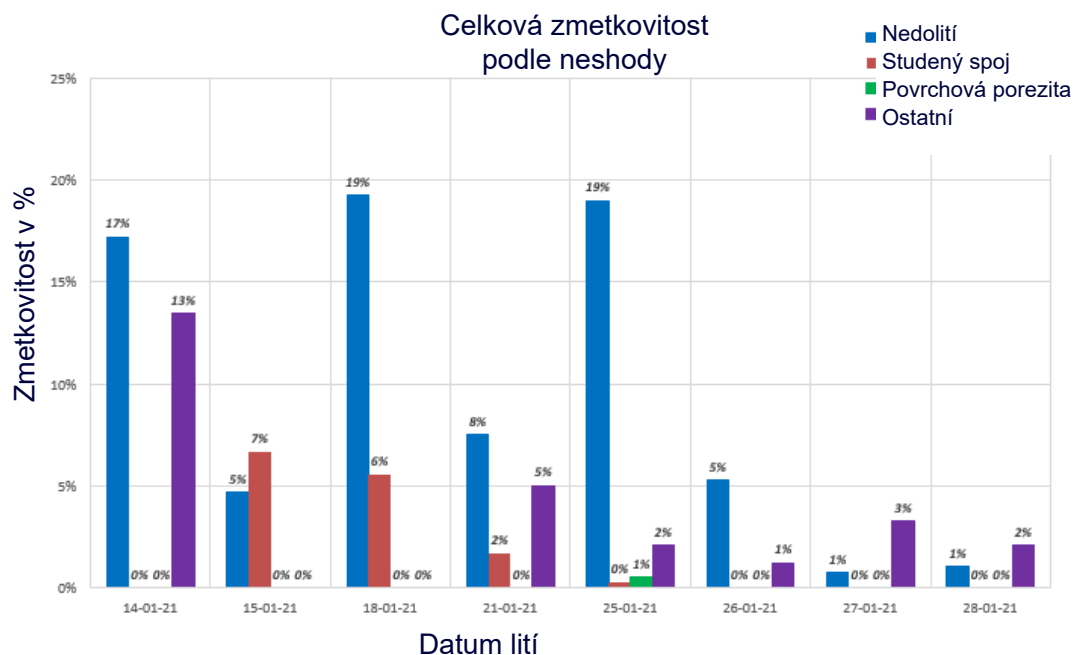
Na níže uvedených grafech je znázorněna zmetkovitost při prvotním lití, které se uskutečnilo dne 14. 01. 2021 až po ukončení vzorkovací fáze dne 28. 01. 2021. Během této fáze se aplikovala řešení z kapitol 6.1, 6.2 a 6.3 a bylo odlito 1050, z toho 525 levých a 525 pravých zadních těchlic. Obrázek 55 znázorňuje celkovou zmetkovitost pro všechny díly, obrázek 56 je pak rozděluje na levé a pravé. Obrázek 57 zobrazuje celkový stav zmetkovitosti podle vad.



Obrázek 55 Graf celkové zmetkovitosti



Obrázek 56 Graf celkové zmetkovitosti pro levý a pravý kus

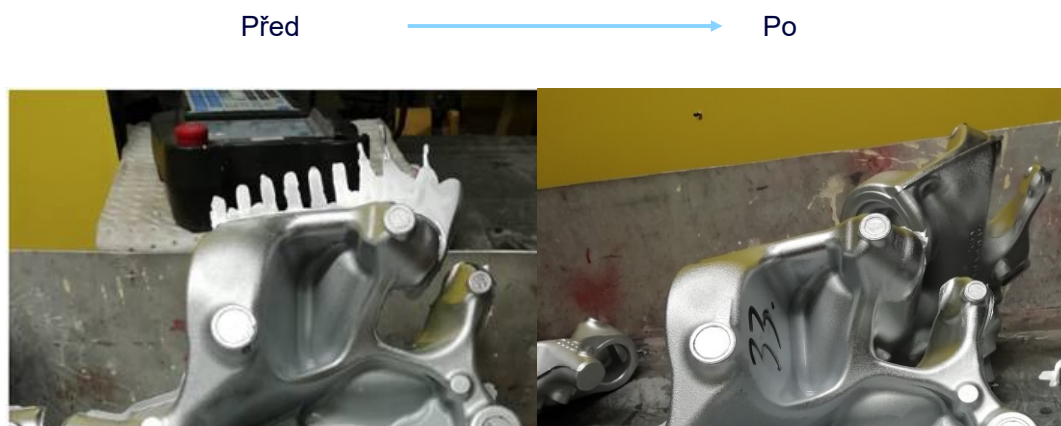


Obrázek 57 Graf celkové zmetkovitosti podle vad (non fill – nedolití, cold lap – studený spoj, surface porosity – povrchová porézita, others – ostatní)

Z výše uvedených grafů je patrné, že během prvních dnů se eliminovaly studené spoje a „others“, **v tomto případě jsou pod „others“ schované zmiňované přetoky.** Modifikace vzdušníku a s tím spojená intenzifikace výfuku vzduchu se prováděla ze dne 25. na 26. 1. 2021 a tento problém prakticky vymizel.

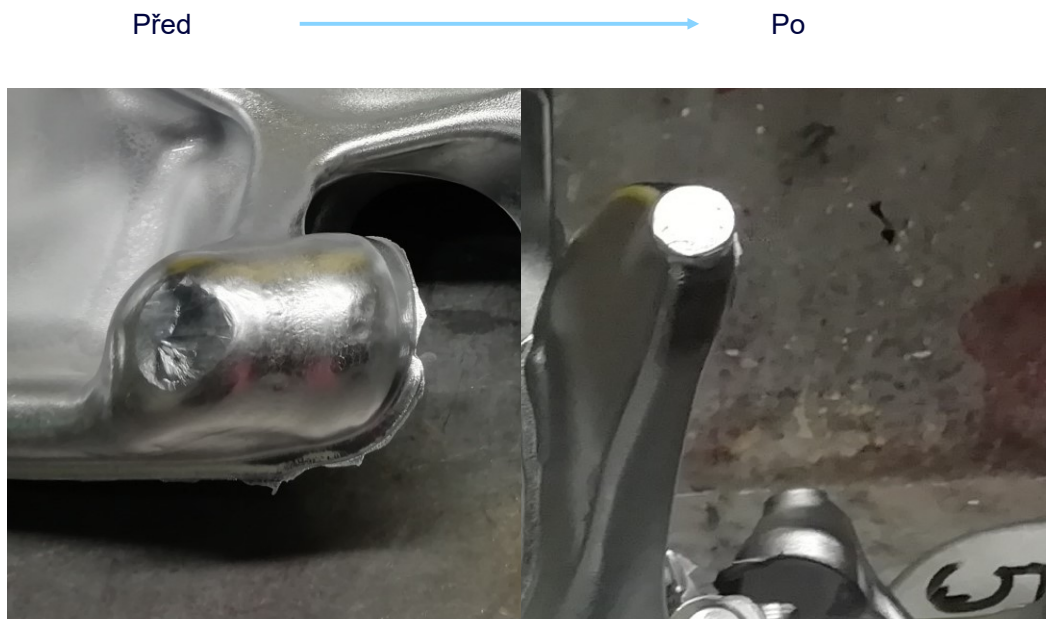
6.5 Shrnutí kapitoly

Vyhodnocení problému s přetoky: Postupné snižování rychlosti plnění mělo za následek odstranění přetoků v dělicí rovině. Na základě testů a sběru dat z licího stroje jsem vyhodnotil, že nejúčinnější bylo plnění při tlaku 5.91 mb/s. Při tomto nastavení se snížil problém s přetoky z původních **13% na 2%**.



Obrázek 58 Ovlivnění přetoků

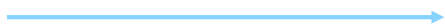
Vyhodnocení problému s nedolitím: Rozšíření ventilačního průduchu o 1 mm způsobilo okamžité zlepšení odvodu uzavřeného vzduchu. Uzavřený vzduch může být díky této modifikaci efektivně vyfukován během plnění formy čímž se snížila celková zmetkovitost způsobená nedolitím z **19% na 1%**.



Obrázek 59 Ovlivnění nedolévání

Vyhodnocení problému se studenými spoji: Nástřik DYCOTE D 34, který je primárně určen na tenkostěnné odlitky pro automobilový průmysl byl aplikován pouze v problematické části odlitku. Důležitou roli zde hrálo stanovení doby účinnosti nástřiku, po kterou byl nástřik funkční. Pokud byla tedy dodržena podmínka, že byl nástřik aplikován na místo každých 10 – 15 cyklů. Dokázalo se snížit výskyt problému z **7% na 0%**

Před



Po



Obrázek 60 Ovlivnění studeného spoje

7 Závěr

Diplomová práce se zabývala problémy siluminových odlitků, odlévaných do ocelových forem a nápravou těchto vad s pomocí moderních výpočetních programů.

V teoretické části diplomové práce rozebírám přidanou hodnotu simulačních, výpočetních a CAD programů, které jsou ve slévárnách takřka nezbytností. Vysvětluji, proč díky nim dosahuje slévárna lepší konkurenceschopnosti a také lepších výrobních výsledků. Dále popisuji víceúrovňové členění slévárenských neshod, které vznikají při odlévání slitin hliníku do ocelových forem. Je zde patrné, že na neshody, jaké jsou třeba staženiny, nelze nahlížet pouze jako na vnitřní vadu, ale že se nám může promítnout také na povrchu odlitku. Detailně ze popisují jakým způsobem vady mohou vznikat a také v jakých lokacích se nejčastěji vyskytují.

Praktická část diplomové práce řeší prvotní vývoj odlitku těhlice z hliníkové slitiny AlSi7Mg0.6 a predikované neshody, které vznikají při odlévání do kokilových forem. Navrhuji zde, jak řešit predikované staženiny a vnitřní porozitu pomocí programu MAGMASoft, který simuluje pochody slévárenské technologie. Také jsem dokázal identifikovat příčinu prasknutí formy v oblasti vtokové soustavy vyvolanou tepelným pnutím a následně implementoval její modifikaci do budoucích forem, díky čemuž se snížilo riziko opakovaného prasknutí formy. V diplomové práci jsem popsal vývoj vzorkování nové formy. Testovaná forma z počátku produkovala odlitky s vyššími neshodami a to zejména s přetoky taveniny mimo geometrickou toleranci odlitku. Zde jsem za pomoci zmírnění plnicí rychlosti formy snížil zmetkovitost z 13% na 2%. Na odlitcích se také objevovala místa, kde uzavřený vzduch nedovolil zcela vyplnit dutinu formy. Zde jsem navrhl postup na zvýšení výfukového otvoru, čímž se snížila zmetkovitost z 19% na 1%. Poslední problém, který jsem při vzorkování řešil byl studený spoj v jednom z žeber na odlitku. Zde bylo nutné vyměnit druh nástřiku formy za nástřík, který je určený pro tenké oblasti forem. Zmetkovitost díky této změně klesla ze 7% na 0%. Toto platilo pouze za splnění podmínky, že byl nástřík opakovaně aplikován každých 15 licích cyklu. Poznatky načerpané během této diplomové práce bych chtěl dále uplatňovat na projektech ve společnosti Aludyne INC.

Seznam použité literatury

Odborná kniha

- [2] Cocks, D. L., "A Proposed Simple Qualitative Classification for Die-Casting Defects," Proc. Die- casting Conference, Montreaux, pp. 19/1-19/15 (1996).
- [3] Campbell, J., Harding, R. A., "Casting Technology," TALAT 2.0 CD-ROM, EAA, Brussels (2000).
- Campbell, J., "Castings," Elsevier Science Ltd., Oxford (2003).
- [4] Walkington, W. G., "Die Casting Defects – Causes and Solutions," North American Die Casting Association (1997).
- [5] European Standard for products made from aluminum & aluminum alloys "EN 12258-1:2012" Standard (2012).
- [6] Gariboldi, E., Bonollo, F., Rosso, M., "Proposal of a Classification of Defects of High-Pressure Diecast Products," La Metallurgia Italiana, vol. 99, p. 39 (2007).
- [7] Flemings, M. C., "Solidification Processing," McGraw- Hill, NY (1974).
- [8] "ASM Metals Handbook," 10th ed., vol. 15, "Casting," ASM - Metals Park, Ohio (1990).
- [9] Di Russo, E., "Metallographic Atlas of Al Foundry Alloys," Edimet, Brescia (1991).
- [10] Brown, J. R., "Non-Ferrous Foundryman's Handbook," Butterworth, Oxford (1999).
- [11] Kubo, K., Pehlke, R. D., "Mathematical Modeling of Porosity Formation in Solidification," Metall. Trans. B, vol. 16, pp. 359-366 (1985).
- [12] Timelli, G., Bonollo, F., "Microstructure, Defects and Properties in Aluminum Alloys Castings: A Review," Proc. Int. Conf. Aluminium Two Thousand, Firenze (2007).
- [13] Lee, P. D., Chirazi, A., See, D., "Modeling Microporosity in Aluminum-Silicon Alloys: A Review," J. Light Met., vol. 1, issue 1, pp. 15-30 (2001).
- [14] Lee, Y. W., Chang, E., Chieu, C. F., "Modeling of Feeding Behavior of Solidifying Al-7Si-0.3Mg Alloy Plate Casting," Metall. Trans. B, vol. 21, issue 4, pp. 715-722 (1990).
- [15] Mathiesen, R. H., Arnberg, L., Ramsoskar, K., "Time Resolved X-Ray Imaging of Aluminum Alloy Solidification Processes," Metall. Mat. Trans B, vol. 33, issue 4, pp. 613-623 (2002).

- [16] Anson, J. P., Gruzleski, J.E., "The Quantitative Discrimination between Shrinkage and Gas Microporosity in Cast Aluminum Alloys Using Spatial Data Analysis," *Mater. Charact.*, vol. 43, issue 5, pp. 319-335 (1999).
- [17] Shin, T. - S., Huang, L. - W., Chen, Y.- J., "Relative Porosity in Aluminium and Aluminium Alloys," *Int. J. Cast Met. Res.*, vol. 18, pp. 301-308 (2005).
- [18] Shang, L. H., Paray, F., Gruzleski, J. E., Bergeron, S., Mercadante, C., Loong, C. A., "Prediction of Microporosity in Al-Si Castings in Low Pressure Permanent Mould Casting Using Criteria Functions," *Int. J. Cast Metals Res.*, vol. 17, pp. 193-200 (2004).
- [19] Wang, Q. G., Apelian, D., Lados, D. A., "Fatigue Behaviour of A356-T6 Aluminum Cast Alloys. Part I. Effect of Casting Defects," *J. Light Met.*, vol. 1, issue 1, pp. 73-84 (2001).
- [20] Wang, Q. G., Apelian, D., Lados, D. A., "Fatigue Behaviour of A356/357 Aluminum Cast Alloys. Part II - Effect of Microstructural Constituents," *J. Light Met.*, vol. 1, issue 1, pp. 85-97 (2001).
- [21] Francis, J. A., Cantin, G. M. D., "The Role of Defects in the Fracture of an Al-Si-Mg Cast Alloy," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 407, issue 1-2, pp. 322-329 (2005). Akhtar, S., Arnberg, L., Di Sabatino, M., Timelli, G.,
- [22] Bonollo, F., "A Comparative Study of Defects and Mechanical Properties in High Pressure Die Cast and Gravity Die Cast Aluminium Alloys," *Int. Foundry Research*, issue 2, pp. 36-48 (2009).
- [23] Merlin, M., Timelli, G., Bonollo, F., Garagnani, G.L., "Impact Behaviour of A356 alloy for Low-Pressure Die Casting Automotive Wheels," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, issue 2, pp. 1060-1073 (2009).
- [24] Dai, X., Yang, X., Campbell, J., Wood, J., "Effects of Runner System Design on the Mechanical Strength of Al-7Si-Mg Alloy Castings," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 354, issues 1-2, pp. 315-325 (2003).
- [25] Cáceres, C. H., Selling, B. I., "Casting Defects and the Tensile Properties of an Al-Si-Mg Alloy", *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 220, pp. 109-116 (1996).
- [26] Avalor, M., Belingardi, G., Cavatorta, M. P., Doglione, R., "Casting Defects and Fatigue Strength of a Die Cast Aluminium Alloy: A Comparison Between Standard Specimens and Production Components," *Int. J. Fatigue*, vol. 24, pp. 1-9 (2002).
- [27] Cáceres, C. H., "A Phenomenological Approach to the Quality Index of Al-Si-Mg Casting Alloys," *Int. J. Cast Metals Res.*, vol. 12, pp. 367-375 (2000).
- [28] Cáceres, C. H., "A Rationale for the Quality Index of Al-Si-Mg Casting Alloys," *Int. J. Cast Metals Res.*, vol. 12, pp. 385-391 (2000).
- [29] Verran, G. O., Mendes, R.P.K., Rossi, M.A., "Influence of Injection Parameters on Defects Formation in Die Casting Al12Si1,3Cu Alloy: Experimental Results and Numeric Simulation," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 179, pp. 190-195 (2006).

- [30] Campbell, J., "Materials Perspective, Entrainment Defects," *Mater. Sci. Technol.*, vol. 22, no. 2, pp. 132-136 (2006).
- [31] Faura, F., López, J., Hernández, J., "On the Optimum Plunger Acceleration Law in the Slow Shot Phase of Pressure Die Casting Machines," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 41, issue 2, pp. 173-191 (2001).
- [32] Timelli, G., Bonollo, F., "Quality Mapping of Aluminium Alloy Diecastings," *Metall. Science and Technol.*, vol. 26, issue 1, pp. 2-8 (2008).
- [33] Timelli, G., Bonollo, F., Cupitò, G., "The Impact of Defects on the Quality of Aluminium Alloys Die Castings," *ATA – Ingegneria dell'autoveicolo*, 62 (1/2), pp. 12-19 (2009).
- [34] Yi, J. Z., "Statistical Modeling of Microstructure and Defect Population Effects on the Fatigue Performance of Cast A356-T6 Automotive Components," *Mat. Sci. Eng.*, vol. 432, issues 1-2, pp. 59-68 (2006).
- [35] Wang, Q. G., "Oxide Films, Pores and the Fatigue Lives of Cast Aluminum Alloys," *Metall. Mater. Trans. B.*, vol. 37, issue 6, pp. 887-895 (2006).
- American Foundry Society, "International Atlas of Casting Defects," pp. 81-87 (1999).
- [36] Moores, A. W., et al. "New Device for the Determination of Hydrogen Concentration in Aluminum Alloys," *AFS Transactions*, vol. 113, pp. 265-274 (2005).
- [37] Marcolongo, P., Evans, J.W., Steingart, D.A., Bonollo, F., "New Probe to Detect Gas Bubbles – Part 1," *Pressocolata e Tecniche Fusorie*, 2, pp. 117-121 (2007).
- [38] Marcolongo, P., Evans, J.W., Steingart, D. ., Bonollo, F., "New Probe to Detect Gas Bubbles – Part 2," *Pressocolata e Tecniche Fusorie*, 2, pp. 96-101 (2007).
- [39] Atwood, R. C., "Diffusion-Controlled Growth of Hydrogen Pores in Al-Si Castings: In Situ Observation and Modelling," *Acta Mater.*, vol. 48, issue 2, pp. 405-417 (2000).
- [40] Chen, X. G., Gruzleski, J. E., "Influence of Melt Cleanliness on Pore Formation in Aluminium-Silicon Alloys," *Int. J. Cast Metals Res.*, vol. 9, pp. 17-26 (1996).
- [41] Yang, X., Huang, X., Dai, X., Campbell, J., Tatler, J., "Numerical Modelling of Entrainment of Oxide Film Defects in Filling of Aluminium Alloy Castings," *Int. J. Cast Metals Res.*, vol. 17, pp. 321-331 (2004).
- [42] Dai, X., Yang, X., Campbell, J., Wood, J., "Influence of Oxide Film Defects Generated in Filling on Mechanical Strength of Aluminium Alloy Castings," *Mater. Sci. Technol.*, vol. 20, issue 4, pp. 505-513 (2004).
- [43] Fox, S., Campbell, J., "Visualisation of Oxide Film Defects During Solidification of Aluminium Alloys," *Scripta Mater.*, vol. 43, issue 10, pp. 881-886 (2000).

- [44] Dispinar, D., Campbell, J., "Use of Bifilm Index as an Assessment of Liquid Metal Quality," *Int. J. Cast Metals Res.*, vol. 19, pp. 5-17 (2006).
- [45] Campbell, J., "An Overview of the Effects of Bifilms on the Structure and Properties of Cast Alloys," *Metall. and Mater. Trans. B*, vol. 37, issue 6, pp. 857-863 (2006).
- [46] Espinoza-Cuadra, J., Garcia-Garcia, G., Mancha- Molinar, H., "Influence of Defects on Strength of Industrial Aluminum Alloy Al – Si 319," *Materials & Design*, vol. 28, issue 3, pp. 1038-1044 (2007).
- [47] Aziz Ahamed, A. K. M., Kato, H., Kageyama, K., Komazaki, T., "Acoustic Visualization of Cold Flakes and Crack Propagation in Aluminum Alloy Die-Cast Plate," *Mater. Sci. Eng., A*, vol. 423, issues 1-2, pp. 313-323 (2006).
- [48] Liu, F., Samuel, F. H., "Effect of Inclusions on the Tensile Properties of Al-7%Si-0.35% Mg (A356.2) Aluminium Casting Alloy," *J. Mat. Sci.*, vol. 33, pp. 2269-2281 (1998).
- [49] Seniw, M., Conley, J., Fine, M., "The Effect of Microscopic Inclusion Locations and Silicon Segregation on Fatigue Lifetimes of Aluminum Alloy A356 Castings," *Mat. Sci. Eng., A*, vol. 285, pp. 43-48 (2000).
- [50] Wang, L., Makhlouf, M., Apelian, D., "Aluminum Die- Casting Alloys - Alloy Composition, Microstructure, and Properties/Performance Relationship," *Int. Materials Review*, vol. 40, pp. 221-238 (1995).
- [51] Timelli, G., Lohne, O., Arnberg, L., Laukli, H. I., "Effect of Solution Heat Treatments on the Microstructure and Mechanical Properties of a Die- Cast AlSi7MgMn Alloy," *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 39, issue 7, pp. 1747-1758 (2008).
- [52] Battle, T. P., "Mathematical Modelling of Solute Segregation in Solidifying Materials," *Int. Mater. Rev.*, vol. 37, issue 1, pp. 249-270 (1992).
- [53] Farupi, J., Drezet, J. M., Rappaz, M., "In Situ Observation of Hot Tearing Formation in Succilonitrile-Acetone," *Acta Mater.* vol. 49, issue 7, pp. 1261-1269 (2001).
- [54] Yan, X., Lin, J. C., "Prediction of Hot Tearing Tendency for Multicomponent Aluminum Alloys," *Metall. And Mater. Trans. B.*, vol. 37, issue 6, pp. 913-918 (2006).
- [55] Knuutinen, A., Nogita, K., McDonald, S. D., Dahle, A. K., "Porosity Formation in Aluminium Alloy A356 Modified with Ba, Ca, Y and Yb," *J. Light Metals*, vol. 1, issue 4, pp. 241-249 (2001).
- [56] Niu, X. P., Hua, B.H., Pinwilla, I., Lib, H., "Vacuum Assisted High Pressure Die Casting of Aluminium Alloys," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 105, pp. 119-127 (2000).
- [57] Kosec, B., Kosec, L., Kopac, J., "Analysis of Casting Die Failures," *Eng. Failure Analysis*, vol. 8, issue 4, pp. 355-359 (2001).

- [58] Chen, Z. W., Jahedi, M. Z., "Die Erosion and its Effect on Soldering Formation in High Pressure Die Casting of Aluminium Alloys," *Mater. Des.*, vol. 20, issue 6, pp. 303-309 (1999).
- [59] Mitterer, C., Holler, F., Üstel, F., Heim, D., "Application of Hard Coatings in Aluminium Die Casting - Soldering, Erosion and Thermal Fatigue Behaviour," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 125, issues 1-3, pp. 233-239 (2000).
- [60] Gulizia, S., Jahedi, M. Z., Doyle, E. D., "Performance Evaluation of PVD Coatings for High Pressure Die Casting," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 140, issue 3, pp. 200-205 (2001).
- [61] Domkin, K., Hattel, J. H., Thorborg, J., "Modeling of High Temperature- and Diffusion-Controlled Die Soldering in Aluminum High Pressure Die Casting," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, issue 8, pp. 4051- 4061 (2009).
- [62] Zhu, H., Guo, J., Ji, J., "Experimental Study and Theoretical Analysis on Die Soldering in Aluminum Die Casting," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 123, issue 2, pp. 229-235 (2002).
- [63] Joshi, V., Srivastava, A., Shivpuri, R., "Intermetallic Formation and its Relation to Interface Mass Loss and Tribology in Die Casting Dies," *Wear*, vol. 256, issues 11-12, pp. 1232-1235 (2004).
- [64] Bentardini, E. K., et al., "Soldering Mechanisms in Materials and Coatings for Aluminum Die Casting," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 202, issue 16, pp. 3764-3771 (2008).
- [65] Zhu, Y., Schwam, D., Wallace, J. F., Birceanu, S., "Evaluation of Soldering, Washout and Thermal Fatigue Resistance of Advanced Metal Materials for Aluminum Die-Casting Dies," *Mater. Sci. Eng., A*, vol. 379, issues 1-2, pp. 420-431 (2004).
- [66] Shankar, S., Apelian, D., "Die Soldering: Mechanism of the Interface Reaction between Molten Aluminum Alloy and Tool Steel," *Metall. Mater. Trans. B*, vol. 33, pp. 465-476 (2002).
- [67] Sundqvist, M., Hogmark, S., "The Mechanisms of Erosive Wear of Die Casting Dies for Aluminium," *Proceedings of the Int. European Conf. on Tooling Materials*, pp. 453-466 (1992).
- [68] Bernacchi, E., Ferrero, A., Gariboldi, G., Korovkin, A., Pontini, G., "PVD Coatings in Aluminium Die Casting Dies and Steel Forming Tools," *Metall. Sci. and Tech.*, vol. 14, issue 1, pp. 3-11 (1996).
- [69] Bucci, M., "Analysis of Defects in Machined High- Pressure Die-Castings of AlSi12Cu2Fe Alloy," MS thesis, University of Padova (1998).
- [70] Persson, A., Hogmark, S., Bergstrom, J., "Failure Modes in Field-Tested Die Casting Dies," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 148, pp. 108-118 (2004).

Elektronické dokumenty a ostatní

[1] *Slévárenské simulační programy*. 2005 Prof. Ing. Iva Nová, CSc, Ing. Petr Kosek, Ing. Jan Šmrha Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/slevarenske-simulacni-programy.html>

[71] *Counter pressure technology*
Dostupné z: <http://cpcmachines.com/technology/>

[72] *Anviloy solutions for high performance moulds and dies*
Dostupné z: <https://www.weldstone.com/en/components-die-casting>

Seznam zkratek

FDO – Foundry degassing stations
MTS – Metal treatment station
CPC – Counter pressure casting
SEM – Scanning electron microscope
FEM – Finite element method
FDM – Finite difference method
MM – Module method
MKP – Metoda konečných prvků
MKD – Metoda konečných diferencí

Seznam obrázků

Obrázek 1 Makrografický snímek staženiny (vlevo) v porovnání s mikrografickým snímek (vpravo)	13
Obrázek 2 (a) Vyobrazení toku kovu kolem dendritů a (b) snímek s inter-dendritickou porezitou. [13].....	15
Obrázek 3 (a) utváření propadliny (b) propadlina je viditelná na povrchu odlitku. [13]	15
Obrázek 4 SEM snímek (a) vzduchová bublina (b) vodíková bublina [13],[27]	17
Obrázek 5 Příklady (a) puchýřů (b) bodlin [13],[37].....	17
Obrázek 6 Příklad (a) studeného spoje a (b) laminace	18
Obrázek 7 (a) Schéma utváření broků a (b) snímek broku se zachyceným vzduchem. .	18
Obrázek 8 Micrografický snímek (a) oxidické blány a (b) region velkých dendritů obklíčený jemnými. [13], [53]	20
Obrázek 9 Makroskopický snímek (a) zanesení a (b) kontaminace	20
Obrázek 10 Mikrografické snímky (a) praskliny (b) trhliny	21
Obrázek 11 (a) Příklad formy postižené letováním a (b) její následné poškození.....	22
Obrázek 12 Schéma vlivu cyklické tepelné únavy na povrch formy a následně na odlitek	22
Obrázek 13 (a) Odřeniny způsobené vyražením (b) povrch odlitku po použití zkorodované formy	22
Obrázek 14 Přetoky	23
Obrázek 15 Striko Westofen.....	25
Obrázek 16 Kelímková pec a FDU	26
Obrázek 17 Vyražázení odlitků do podavače	26
Obrázek 18 Quench	27
Obrázek 19 Laserovací stanice	27
Obrázek 20 Střížný lis.....	28
Obrázek 21 Kotoučová pila	28
Obrázek 22 X-Ray	29
Obrázek 23 Zadní těhlice	30
Obrázek 24 Přední těhlice.....	31
Obrázek 25 Kontrolní ramena.....	32
Obrázek 26 Prvky těhlice.....	34
Obrázek 27 Prvky těhlice s jádrem	35
Obrázek 28 Tloušťka stěn s jádrem	35
Obrázek 29 Vtoková soustava kontrolního ramene	36
Obrázek 30 Přídavky na obrobení	36
Obrázek 31 Úkosy	37
Obrázek 32 Tuhnutí odlitku	38
Obrázek 33 Řešení problémů s izolací tekutého kovu.....	39
Obrázek 34 Von Misses hot-spot.....	40
Obrázek 35 Modifikace designu	40
Obrázek 36 Lící stroj CPC.....	41
Obrázek 37 Popis formy a rámu	42
Obrázek 38 Forma a rám	43
Obrázek 39 Detaily formy	44
Obrázek 40 Konstrukce kavity	44
Obrázek 41 Kavita - Jádro	45
Obrázek 42 Kavita - Jádro	45

Obrázek 43 Lokální přehřátí stěn formy	46
Obrázek 44 Využití prvku anviloy.....	47
Obrázek 45 Chlazení.....	48
Obrázek 46 Schéma chlazení	49
Obrázek 47 Prasklina	50
Obrázek 48 Rozložení chlazení	50
Obrázek 49 Zvětšení radia na vtokovém kůlu	51
Obrázek 50 Přetoky na odlévaném dílu	52
Obrázek 51 Oblasti nedolití	53
Obrázek 52 Zvětšení prostoru pro výfuk vzduchu.....	54
Obrázek 53 Zvětšení prostoru pro výfuk vzduchu.....	54
Obrázek 54 Studený spoj	55
Obrázek 55 Graf celkové zmetkovitosti	57
Obrázek 56 Graf celkové zmetkovitosti pro levý a pravý kus.....	57
Obrázek 57 Graf celkové zmetkovitosti podle vad (non fill – nedolití, cold lap – studený spoj, surface porosity – povrchová porezita, others - ostatní)	58
Obrázek 58 Ovlivnění přetoků.....	59
Obrázek 59 Ovlivnění nedolévání	59
Obrázek 60 Ovlivnění studeného spoje	60

Seznam tabulek

Tabulka 1 Simulační softwary	10
Tabulka 2 Víceúrovňová klasifikace neshod	14
Tabulka 3 Porovnání anviloy a H13 oceli	47
Tabulka 4 Schéma chlazení	49
Tabulka 5 Specifikace nástřiků DYCOTE - zdroj FOSECO.....	56